



**Artur de Oliveira
Pereira**

**Plataforma de Simulação para Sistemas Rádio
Oportunistas**



**Artur de Oliveira
Pereira**

Plataforma de Simulação para Sistemas Rádio Oportunistas

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Atílio Manuel da Silva Gameiro, Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro do Projecto ORACLE,
IST-2006-27965.

o júri

presidente

Doutor José Carlos da Silva Neves
professor catedrático da Universidade de Aveiro

vogais

Doutor Atílio Manuel da Silva Gameiro
professor associado da Universidade de Aveiro

Doutor Fernando José da Silva Velez
professor auxiliar da Universidade da Beira Interior

agradecimentos

Este espaço é dedicado àqueles que, de uma forma directa ou indirecta, contribuíram para a realização desta dissertação. A todos eles deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Desejo expressar o meu reconhecido agradecimento ao Prof.^o Doutor Atílio Manuel da Silva Gameiro que propôs e orientou esta dissertação de Mestrado. As notas dominantes da sua orientação foram a utilidade das suas recomendações, disponibilidade e cordialidade com que sempre me recebeu.

Um abraço muito especial ao Eng.^o Paulo Marques que sempre arranjou tempo para responder às mais diversas e variadas questões. A ele o meu agradecimento e admiração.

Naturalmente agradeço ao Instituto de Telecomunicações – pólo de Aveiro as boas condições de investigação que foram capazes de proporcionar.

Ao projecto ORACLE, IST-2006-27965, pelo apoio financeiro e possibilidade de partilhar conhecimentos numa equipa multidisciplinar.

Deixo também uma palavra de agradecimento aos membros do grupo MOTION, pelo ambiente de camaradagem e pelo companheirismo que demonstraram.

Por último, agradeço calorosamente aos meus pais e irmã pelo apoio e motivação prestados ao longo deste percurso. À Prof.^a Graça Moreira, pela sua força de vontade contagiante e exemplo de perseverança.

À Joana, por tudo...pelo apoio, pelas palavras, pelo silêncio e claro, pelos momentos...

palavras-chave

espectro subutilizado, rádio cognitivo, rádio oportunista, sistemas celulares, simulador de sistema, UMTS FDD, UMTS TDD, redes celulares primárias, redes celulares secundárias, detecção do espectro, oportunidades espectrais

resumo

O presente trabalho propõe-se estudar o desafio da partilha de espectro entre sistemas primários licenciados e utilizadores secundários não licenciados, mais especificamente avaliar as oportunidades de comunicação secundária em redes celulares UMTS.

Para tal, alude-se, de forma breve, o problema da escassez de espectro, introduzem-se os conceitos de Rádio Cognitivo/Oportunista, apresentam-se as várias técnicas e desafios da detecção de espectro, e descreve-se o cenário celular sobre o qual incidiu este estudo.

Apresenta-se o simulador de sistema. Descrevem-se os blocos de maior interesse da sua arquitectura bem como as modificações efectuadas para a inclusão de sistemas rádio oportunistas. Discutem-se e definem-se métricas para avaliação e caracterização das oportunidades de comunicação rádio oportunista em ambientes celulares UMTS.

De uma forma geral, os resultados demonstram uma coexistência saudável entre sistemas primários e rádio oportunistas, desde que o compromisso entre potência de emissão rádio oportunista e número de frequências licenciadas disponíveis seja considerado.

keywords

under-utilized spectrum, cognitive radio, opportunistic radio, cellular systems, system level simulator, UMTS FDD, UMTS TDD, primary cellular networks, secondary cellular networks, spectrum sensing, spectrum opportunities

abstract

This work studies the challenge of spectrum-sharing between licensed cellular mobile communication systems and unlicensed users. The aim is to evaluate the secondary communication opportunities in UMTS cellular networks.

To achieve that goal, we address the issue of spectrum scarcity, we introduce the Cognitive/Opportunistic radio concepts, we show the spectrum sensing techniques and challenges and we describe the cellular scenario considered in this work.

Then we present the system level simulator, the main architecture blocks as well as the changes in the platform to include opportunistic radios systems. We propose and discuss metrics to evaluate and characterize opportunistic radio communication opportunities in UMTS cellular environments.

The results show that a reasonable opportunistic radio transmission power and a moderate number of available licensed frequencies will allow the deployment of opportunistic radio networks in a coexistence environment with existing licensed systems.

“A dúvida é o princípio da sabedoria”

Aristóteles (384-322 a.C.)

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
Lista de Acrónimos	xi
Lista de Símbolos	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJECTIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
1.4 CONTRIBUIÇÕES	4
2 SISTEMAS RÁDIO OPORTUNISTAS	7
2.1 ESCASSEZ DE ESPECTRO	7
2.2 RÁDIO COGNITIVO	11
2.2.1 Rádio Cognitivo no Sentido Lato	11
2.2.1.1 Capacidade Cognitiva	13
2.2.1.2 Reconfigurabilidade	14
2.2.2 Rádio Cognitivo/Oportunista no Sentido Estrito	15
2.2.2.1 Estado da Arte	15
2.3 PRINCIPAIS DESAFIOS	21
2.3.1 Detecção Espectral	21
2.3.1.1 Detecção Localizada (detecção não cooperativa)	21
2.3.1.2 Detecção Cooperativa	24
2.3.1.3 Detecção Baseada na Interferência	25
2.3.1.4 Desafios da Detecção Espectral	27
2.4 CENÁRIO CELULAR	28
2.4.1 Rádios Oportunistas em Redes Celulares	28
3 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO	35
3.1 ARQUITECTURA DO SIMULADOR	35
3.1.1 Domínio da Coordenação de Tarefas	36

3.1.2	Domínio da Interação Humana	37
3.1.3	Domínio de Resultados	37
3.1.4	Domínio do Problema	37
3.1.4.1	Cenário Celular	38
3.1.4.2	Modelo de Canal	38
3.1.4.3	Modelo de Interferência	41
3.1.4.4	Modelo de Mobilidade	43
3.1.4.5	Interface com a Camada Física	43
3.1.4.6	Modelos de Tráfego	43
3.1.4.7	Esquema ARQ.....	44
3.1.4.8	Alocação Dinâmica de Recursos.....	44
3.2	INCLUSÃO DE SISTEMAS RÁDIO OPORTUNISTAS.....	44
3.2.1	Cálculo das Perdas de Canal L_o	46
3.2.2	Modos de Funcionamento Rádio Oportunista Implementados.....	48
3.2.2.1	Modo Estático (Mapas de Interferência).....	49
3.2.2.2	Modo Dinâmico	50
3.3	MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE COMUNICAÇÃO.....	52
3.3.1	Modo Estático	52
3.3.1.1	Probabilidade de Comunicação.....	52
3.3.2	Modo Dinâmico.....	53
3.3.2.1	Tempo de Comunicação.....	53
3.3.2.2	Duração da Oportunidade e Interferência	53
3.3.2.3	Probabilidade de Transição	54
4	AVALIAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE COMUNICAÇÃO	59
4.1	CONFIGURAÇÃO DO SIMULADOR DE SISTEMA	59
4.2	RESULTADOS	63
4.2.1	Modo Estático	63
4.2.2	Modo Dinâmico.....	66
4.2.2.1	Tempo de Comunicação.....	67
4.2.2.2	Duração da Oportunidade	69
4.2.2.3	Duração da Interferência.....	75
4.2.2.4	Probabilidade de Transição	80
5	CONCLUSÕES	87
A	DERIVAÇÕES	91

A.1	EXPRESSÃO (3-32)	91
A.2	EXPRESSÃO (3-33) E (3-34).....	93
A.3	EXPRESSÃO (3-35)	95
Referências		97

Índice de Figuras

Figura 2-1	Ocupação espectral em cada banda – medidas efectuadas na cidade de Arlington, estado da Virgínia, EUA, Abril de 2004 [3].....	8
Figura 2-2	Ocupação espectral em cada banda – medidas efectuadas durante a Convenção Republicana de 2004 em Nova Iorque, EUA	9
Figura 2-3	Ocupação espectral em cada banda – medidas efectuadas na cidade de Vienna, estado da Virgínia, EUA, Dezembro de 2004	10
Figura 2-4	Conceito de buraco/oportunidade espectral	12
Figura 2-5	Ciclo cognitivo	13
Figura 2-6	Classificação das técnicas de detecção espectral	21
Figura 2-7	Problema da detecção localizada: (a) receptor e (b) desvanecimento lento	24
Figura 2-8	Modelo de temperatura de interferência [54].....	26
Figura 2-9	Arrendamento de bandas seleccionadas oportunisticamente	28
Figura 2-10	Utilização oportunista da banda de frequência UMTS FDD DL	30
Figura 2-11	Rádios oportunistas UMTS TDD em redes celulares primárias UMTS FDD	31
Figura 2-12	Redes celulares heterogéneas.....	32
Figura 2-13	Sobreposição dos mapas de interferência para $N=2$	33
Figura 3-1	Arquitectura do simulador de sistema.....	36
Figura 3-2	Modelo de sistema	37
Figura 3-3	Representação do cenário celular.....	38
Figura 3-4	Diagrama de blocos referente ao cálculo do desvanecimento lento.....	40
Figura 3-5	Canais de propagação entre os vários dispositivos activos no sistema	46
Figura 3-6	Cálculo/actualização do desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário n ...	47
Figura 3-7	Abordagem para o cálculo do desvanecimento lento entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n	48
Figura 3-8	Modo estático	49
Figura 3-9	Modo dinâmico.....	50
Figura 3-10	Intervalos de tempo de transmissão com e sem comunicação rádio oportunista ($N=2$).....	54
Figura 3-11	Cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista	55
Figura 3-12	Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista	56
Figura 3-13	Estado S_A da cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista ($N=2$)	57

Figura 4-1	Banda associada à portadora unidireccional no UMTS FDD	61
Figura 4-2	Mapas de interferência para a frequência f_1 , e $P_o=0$ dBm	64
Figura 4-3	Mapas de interferência para a frequência f_2 , e $P_o=0$ dBm	64
Figura 4-4	Mapas de interferência para $N=2$ (f_1+f_2), e $P_o=0$ dBm.....	64
Figura 4-5	Mapas de interferência para $N=3$ ($f_1+f_2+f_3$), e $P_o=0$ dBm.....	64
Figura 4-6	Mapas de interferência para $N=1$, e $P_o=5$ dBm	65
Figura 4-7	Mapas de interferência para $N=3$, e $P_o=5$ dBm	65
Figura 4-8	Mapas de interferência para $N=1$, e $P_o=10$ dBm	65
Figura 4-9	Mapas de interferência para $N=3$, e $P_o=10$ dBm	65
Figura 4-10	Probabilidade de comunicação em função do número de frequências disponíveis, para $P_o = 0, 5$ e 10 dBm	66
Figura 4-11	Caminho típico de um terminal móvel na área da célula durante o tempo de simulação (duração da chamada RO).....	67
Figura 4-12	Tempo de comunicação em função do número de frequências disponíveis, para $P_o = 0, 5$ e 10 dBm.....	67
Figura 4-13	Tempo de comunicação em função da potência de emissão do RO, para $N = 1, 2$ e 3	68
Figura 4-14	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-40$ dBm.....	69
Figura 4-15	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-38$ dBm.....	69
Figura 4-16	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-36$ dBm.....	70
Figura 4-17	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-34$ dBm.....	70
Figura 4-18	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-32$ dBm.....	70
Figura 4-19	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-30$ dBm.....	70
Figura 4-20	Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=1$, e $\Delta t_o =]20;90]$ s	71
Figura 4-21	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-28$ dBm.....	72
Figura 4-22	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-26$ dBm.....	72
Figura 4-23	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-24$ dBm.....	72
Figura 4-24	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-22$ dBm.....	72
Figura 4-25	Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=2$, e $\Delta t_o =]20;90]$ s	73
Figura 4-26	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-24$ dBm.....	73
Figura 4-27	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-22$ dBm.....	73
Figura 4-28	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-20$ dBm.....	74
Figura 4-29	Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-18$ dBm.....	74
Figura 4-30	Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=1,2$ e 3 , e $\Delta t_o =]20;90]$ s	75
Figura 4-31	Probabilidade em função da duração da interferência para $N=1$, e $P_o=10$ dBm.....	76
Figura 4-32	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 0 e 1 s, para $N=1$, e $P_o=10$ dBm.....	76

Figura 4-33	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 0 e 0.1s, para $N=1$, e $P_o=10$ dBm	76
Figura 4-34	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=10$ dBm	77
Figura 4-35	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=0$ dBm	78
Figura 4-36	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=-10$ dBm	78
Figura 4-37	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=-20$ dBm	78
Figura 4-38	Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=-30$ dBm	78
Figura 4-39	Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=1$ e $\Delta t_i=2$ ms.....	79
Figura 4-40	Cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando $N=2$	80
Figura 4-41	Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=-30$ dBm.....	81
Figura 4-42	Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=-20$ dBm.....	81
Figura 4-43	Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=-10$ dBm.....	81
Figura 4-44	Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=0$ dBm	82
Figura 4-45	Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=10$ dBm	82
Figura 4-46	Tempo de comunicação em função da potência de emissão do rádio oportunista, determinada com base nas métricas T_c e $(1-\pi_0)T_{cd}$	84
Figura 4-47	π_1 e π_2 em função da potência de emissão do RO, para $N=2$	84
Figura A-1	Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista	91
Figura A-2	Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_0	94
Figura A-3	Cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando os estados S_1 e S_2	95
Figura A-4	Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_A	95

Índice de Tabelas

Tabela 3-1	Parâmetros do desvanecimento lento.....	40
Tabela 3-2	Atrasos e amplitudes das componentes multipercurso do modelo ITU veicular A	41
Tabela 4-1	Resumo dos parâmetros empregues nas simulações.....	61
Tabela 4-2	Tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=1$ e $P_o=[-40;-30]$ dBm	71
Tabela 4-3	Tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=2$ e $P_o=[-30;-22]$ dBm	73
Tabela 4-4	Tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=3$ e $P_o=[-26;-18]$ dBm	74
Tabela 4-5	Tabela resumo da probabilidade em função da duração da interferência, para $N=1$ e $P_o=[10;-30]$ dBm	78
Tabela 4-6	Tabela resumo da probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$ e $P_o=[10;-30]$ dBm.....	79
Tabela 4-7	Tabela resumo da probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$ e $P_o=[-30;10]$ dBm	82
Tabela 4-8	Probabilidades π_0 , π_1 e π_2 , em função da P_o , para $N=2$	83
Tabela 4-9	Probabilidade de comunicação $(1-\pi_0)$ e respectivo tempo de comunicação, em função da P_o , para $N=2$	83
Tabela 4-10	Tempo médio $T(S_0)$, $T(S_A)$ e duração média $\Delta t_{S1,S2}$, em função da P_o , para $N=2$	85

Lista de Acrónimos

3G	<i>3rd Generation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
ARQ	<i>Automatic Repeat-reQuest</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CAB	<i>Coordinated Access Band</i>
CAC	<i>Call Admission Control</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CLPC	<i>Closed-Loop Power Control</i>
CORVUS	<i>A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum</i>
COST	<i>European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research</i>
CPE	<i>Consumer Premise Equipment</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DEP	Densidade Espectral de Potência
DIMSUNet	<i>Dynamic Intelligent Management of Spectrum Ubiquitous Mobile Networks</i>
DL	<i>Downlink</i>
DRIVE	<i>European Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Allocation</i>
EB	Estação Base
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCC	<i>Federal Communications Commision</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GCC	<i>Group Control Channel</i>
GOE	Gestão de Oportunidades Espectrais
GPS	<i>Global Positioning System</i>

GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
H-ARQ	<i>Hybrid ARQ</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
ICT	<i>Informação, Comunicação e Tecnologia</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPMobile	<i>Mobile Broadband Communication Services</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union-Radiocommunication</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MOTION	<i>Mobile Systems Communication Group</i>
NPRM	<i>FCC - Notice of Proposed Rule Making</i>
NSF	<i>National Science Foundation</i>
OCRA	<i>OFDM-based Cognitive Radio</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OLPC	<i>Open-Loop Power Control</i>
ORACLE	<i>Opportunistic Radio Communications in Unlicensed Environments</i>
OverDRiVE	<i>Spectrum Efficient Uni- and Multicast Over Dynamic Radio Networks in Vehicular Environments</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RAN-MAN	<i>Radio Access Network Manager</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RO	<i>Rádio Oportunista</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SIR	<i>Signal-to-Interference Ratio</i>
SMA	<i>Statistically Multiplexed Access</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPIM	<i>Spectrum Information and Management</i>
SPTF	<i>FCC - Spectrum Policy Task Force</i>

SSC	<i>Shared Spectrum Company</i>
SUG	<i>Secondary User Group</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TV	Televisão
UCC	<i>Universal Control Channel</i>
UCD	Unidade Central de Decisão
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UP	Utilizador Primário
UWB	<i>Ultra-Wideband</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WiFi	IEEE 802.11
WRAN	<i>Wireless Regional Area Network</i>
WRC	<i>World Radiocommunication Conference</i>
XG	<i>Next Generation</i>

Lista de Símbolos

A_{cel}	área da célula
d	distância
D	distância de decorrelação espacial do desvanecimento lento
D_{pc}	intervalo de tempo entre as chamadas de dados
D_t	iteração T_{ti}
E_b	energia de bit
f_c	frequência da portadora
$E(.)$	número médio de transições
F	função espacial para geração do desvanecimento lento bidimensional
F_0	função espacial para geração do desvanecimento lento bidimensional
FF	perdas de desvanecimento rápido
f_i	i -ésima frequência disponível
$f_y(x)$	função probabilidade de distribuição da SNR sob desvanecimento
G	ganho de processamento da ligação entre a estação base e o utilizador primário
G_{EB}	ganho da antena da estação base
G_o	ganho de processamento da ligação entre o rádio oportunista e o utilizador primário
G_{RO}	ganho da antena do rádio oportunista
G_{UP}	ganho da antena do utilizador primário
G_V	ganho da antena da estação base vizinha
h	ganho de amplitude do canal
H_0	ausência de sinal do utilizador primário
H_1	presença de sinal do utilizador primário
I	nível de potência da interferência no utilizador primário
I_{inter}	interferência intercelular
I_{intra}	interferência intracelular
I_o	interferência causada pelo rádio oportunista no utilizador primário
I_{RO}	nível de potência da interferência incluindo a contribuição do rádio oportunista
K	número de utilizadores primários activos na frequência f_i
K_{all}	número de utilizadores primários activos numa determinada área geográfica ($K_{all} = K \times N$)
L	perdas do canal entre a estação base e o utilizador primário
l	número de colunas da matriz célula

L_{EB}	perdas na estação base (perdas nos cabos)
L_o	perdas do canal entre o rádio oportunista e o utilizador primário
L_{UP}	perdas no utilizador primário (perdas corporais)
L_v	perdas do canal entre a estação base vizinha e o utilizador primário
L_V	perdas na estação base vizinha (perdas nos cabos)
M	número de rádios oportunistas activos numa determinada área geográfica
m	número de linhas da matriz célula
N	número de frequências disponíveis na área de cobertura da célula
$N(.,.)$	distribuição Gaussiana
$n(t)$	ruído branco Gaussiano (AWGN)
N_0	densidade espectral de potência do ruído aditivo
N_{00}	número médio de transições desde que a frequência de portadora sai do estado S_0 até que regresse ao estado S_0
N_{EB}	número de sectores/estações base vizinhas
NF	figura de ruído do utilizador primário
N_{max}	número máximo de frequências disponíveis na área de cobertura da célula
N_{Ti}	número de T_{ti} durante a chamada rádio oportunista ($N_{Ti} = T_{cd}/T_{ti}$)
Nt_{ij}	número de transições entre o estado i e o estado j durante a chamada rádio oportunista
Nt_{int}	número de transições entre as frequências f_1 e f_2 (estado S_A - transições internas)
P	potência de emissão da estação base
p	número de canais H-ARQ
$P(n)$	probabilidade de ocorrerem n transições
P_{ij}	probabilidade de transição entre o estado i e o estado j
\hat{P}_{ij}	probabilidade de transição entre o estado i e o estado j , obtido por meio de simulação
\tilde{P}	matriz probabilidade de transição
P_b	probabilidade de bloqueio de comunicação rádio oportunista
P_c	probabilidade de comunicação rádio oportunista
P_d	probabilidade de detecção do utilizador primário
P_f	probabilidade de falso alarme do utilizador primário
PL	perdas de propagação entre a estação base e o utilizador primário
PL_o	perdas de propagação entre o rádio oportunista e o utilizador primário
P_o	potência de emissão do rádio oportunista
P_r	potência recebida pelo utilizador primário
Pr	probabilidade
P_v	potência de emissão da estação base vizinha
$Q_m(.,.)$	função de Marcum

R	correlação espacial do desvanecimento lento
r	caminho percorrido pelo utilizador primário
R_b	débito de informação do serviço (no sistema primário)
ro	caminho percorrido pelo rádio oportunista
$s(t)$	sinal transmitido pelo utilizador primário
S_0	estado correspondente à frequência f_0
S_A	estado correspondente à frequência $f_1 \dots f_N$
S_f	estado final
S_i	estado correspondente à frequência f_i
S_{in}	estado inicial
SH	perdas de desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário, no instante t_q
SH_o	perdas de desvanecimento lento entre o rádio oportunista e o utilizador primário
SH_{old}	perdas de desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário, no instante t_{q-1}
T	intervalo de observação
$T(S_0)$	tempo médio em que a frequência de portadora do RO permanece em S_0
$T(S_A)$	tempo médio em que a frequência de portadora do RO permanece em S_A
T_c	soma dos T_{ti} nos quais houve comunicação rádio oportunista
T_{cd}	tempo de duração da chamada rádio oportunista ($T_{cd} = T_c + T_{off}$)
T_{off}	soma dos T_{ti} nos quais não houve comunicação rádio oportunista
t_q	q -ésimo intervalo de tempo
T_{ti}	intervalo de tempo de transmissão (2 ms)
u	produto tempo largura de banda
W	largura de banda do sinal
X	ocorrência ou não ocorrência de transição entre frequências disponíveis
X	variável com distribuição $N(\mu, \sigma)$
x	tempo passado em S_0
$x(t)$	sinal recebido pelo utilizador secundário
Y	sinal de saída do integrador
y	tempo passado em S_A
α	probabilidade de transição de S_0 para S_0
α_c	factor de ortogonalidade da célula central
β	probabilidade de transição de S_A para S_A
$\Delta t_{S1,S2}$	duração média entre transições de frequência
Δt_i	duração da interferência do rádio oportunista
Δt_o	duração da oportunidade de comunicação rádio oportunista
Δt_p	duração da comunicação proibida do rádio oportunista

γ	limiar da relação sinal interferência
γ_{SNR}	limiar da relação sinal ruído
$\Gamma(.)$	função gama completa
$\Gamma(.,.)$	função gama incompleta
λ	limiar de comparação
μ	média
π_i	probabilidade do rádio oportunista estar no estado S_i
σ	desvio padrão do desvanecimento lento
$\bar{\tau}$	duração média entre transições
$\vec{\Pi}$	vector $\pi_i, i=0...N$
$\bar{\Omega}_A$	média da região de comunicação permitida
Ω_A	região de comunicação permitida
$\langle . \rangle_t$	operação de média temporal

1

Introdução

1.1 *Motivação e Enquadramento*

Nas últimas décadas a utilização do espectro electromagnético assumiu uma importância preponderante na sociedade, sendo este meio usado para troca de informação crítica ou simplesmente para entretenimento. Com o decorrer do tempo a importância deste recurso foi sendo cada vez mais valorizada à medida que as bandas de frequência associadas a aplicações específicas foram preenchendo todo o espectro utilizável. Actualmente espera-se disponibilidade dos serviços de comunicação em qualquer lugar, e ainda que os mesmos possam ser utilizados quando os equipamentos se encontrem efectivamente em movimento. Outro aspecto fundamental dos sistemas de comunicação, relativamente às necessidades num curto/médio prazo, reside na crescente procura de maiores débitos/largura de banda de transmissão, colocando mais e mais pressão na disponibilidade do espectro.

Actualmente o acesso ao espectro rádio é muito difícil; o acesso é restringido por um antigo regime de regulamentação de comando e controlo que emergiu durante o último século. Como consequência, uma vasta parte do espectro rádio é atribuído a serviços rádio licenciados e somente uma pequena fracção do espectro rádio é de livre acesso, operação não licenciada. Esta discrepância tende a acentuar-se uma vez que o processo de alteração da actual regulamentação de bandas licenciadas para bandas não licenciadas é difícil e moroso. A comprovar esta tendência surge a WRC 2007 (*World Radiocommunication Conference*), organizada sob o auspício da ITU (*International Telecommunications Union*), com o intuito de disponibilizar novas bandas de espectro licenciado [1].

Estudos/medidas recentes sobre utilização espectral mostram que grande parte do espectro licenciado é subtilizado [2][3][4][5], ou seja, uma vasta parte de espectro está disponível quando ambas as dimensões de espaço e tempo são consideradas, razão pela qual o problema está, na maioria das vezes, relacionado com o “acesso ao espectro” e não com a escassez de espectro. Afigura-se que os métodos tradicionais de comando e controlo, relativamente a gestão espectral, tenham atingido o seu limite, e deste modo, uma das alternativas para a escassez de espectro

passa por permitir o acesso dinâmico, por parte de outros sistemas, a bandas licenciadas subutilizadas (i.e. sempre e onde quer que o titular da licença não utilize o seu espectro na totalidade) [6].

Terminais não licenciados que sejam capazes de analisar o ambiente onde “vivem”, raciocinar acerca deste ambiente, tomar decisões e aprender com os resultados dessas decisões, são geralmente intitulados de “rádios cognitivo” [7]. No sentido lato, um rádio cognitivo é um rádio capaz de modificar os seus parâmetros de transmissão baseado na interacção com o ambiente rádio em que opera. Contudo, neste trabalho, considera-se a definição estrita, na qual o conhecimento do ambiente rádio considerado é restrito ao conhecimento do espectro; geralmente denominado de Rádio Oportunista (RO). Podem antever-se vários cenários para a aplicação de rádios oportunistas. Neste trabalho considera-se o cenário onde, para além de libertar novas bandas de espectro, o regulador permite a utilização de um mercado secundário, isto é os utilizadores secundários podem usufruir do espectro licenciado desde que os mesmos não causem interferência prejudicial aos proprietários das bandas licenciadas, utilizadores primários (UP) [8]. Neste cenário, o rádio oportunista coordena automaticamente a utilização do espectro partilhado. Os rádios oportunistas procuram activamente o espectro rádio na tentativa de encontrar bandas de frequência disponíveis, para depois usá-las dinamicamente ajustando as suas transmissões no sentido de evitar causar interferência prejudicial aos utilizadores primários licenciados.

Apesar de conceptualmente simples, existem vários desafios técnicos que devem ser estabelecidos e resolvidos para o desenvolvimento de redes rádio oportunistas [9][10][11][12]. Nomeadamente, em termos de desenvolvimento de dispositivos ou arquitectura de sistema, i.e. desenvolvimento de procedimentos de comunicação e algoritmos que permitam a identificação e caracterização das oportunidades espectrais, desenvolvimento de dispositivos de detecção espectral de banda larga, definição das arquitecturas emissor/receptor por forma a integrar a nova dimensão de detecção espectral na pilha protocolar.

A nível de sistema, independentemente do tipo de algoritmo ou protocolo usado, o recurso a simulações é indispensável para a avaliação de desempenho da rede rádio oportunista e respectivo impacto nos sistemas licenciados, com os quais deve coexistir. Note-se que, uma avaliação em cenários realistas é demasiado complexa para ser suportada por modelos simples obtidos por análise teórica; o desenvolvimento de um banco de testes físico é excessivamente dispendioso; na maioria dos casos a flexibilidade é reduzida e, no caso das comunicações rádio, impedida pelos desafios legais associados as políticas de espectro. Assim sendo, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de simular a coexistência entre um sistema secundário rádio oportunista e sistemas celulares licenciados.

A plataforma de simulação baseia-se num simulador de sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) com modificações por forma a suportar sistemas rádio oportunistas.

O simulador de sistema considera que existem N sistemas celulares numa área geográfica que operam nas bandas de frequência $f_1 \dots f_N$. Sob a mesma área existe uma rede de rádios oportunistas com permissão para utilizar qualquer uma das N bandas de frequência, cuja comunicação tem prioridade secundária, ou seja, o rádio oportunista pode transmitir na banda f_i desde que não degrade o desempenho dos utilizadores celulares licenciados.

Para cada frequência f_i o simulador de sistema calcula a interferência causada pelo rádio oportunista em cada utilizador da rede celular. Estes valores são posteriormente usados para identificar as posições/regiões onde a comunicação rádio oportunista é permitida/proibida. Desta forma, é possível calcular estatísticas para uma rede rádio oportunista, designadamente a probabilidade ou tempo de comunicação rádio oportunista, o qual representa o tempo durante uma chamada em que um rádio oportunista não é bloqueado por restrições da rede primária, em termos de potência emitida e número de frequências disponíveis. A duração da oportunidade e da interferência bem como a probabilidade de um rádio oportunista comutar de frequência de portadora, são outras das métricas analisadas neste trabalho.

1.2 Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo central a avaliação das oportunidades de comunicação de um rádio oportunista numa rede primária celular baseada em UMTS FDD (*Universal Mobile Telecommunications System - Frequency Division Duplex*).

De uma forma geral, pretende demonstrar-se o impacto das frequências licenciadas disponíveis na probabilidade de comunicação, no tempo de comunicação rádio oportunista e nas características das oportunidades. Pretende ainda avaliar-se essas métricas em função da potência emitida pelo rádio oportunista. Por último, ambiciona-se analisar a probabilidade de um rádio oportunista transitar de estado de comunicação devido às limitações das redes primárias. Estas métricas foram avaliadas para condições idênticas de simulação, nomeadamente no que respeita a modelos de canal, modelos de mobilidade, carga de utilizadores nas frequências licenciadas disponíveis assim como os requisitos de relação sinal interferência e potência recebida dos utilizadores primários.

Para alcançar os objectivos pretendidos foi necessário modificar o simulador de sistema, implementado em software - linguagem C++, de modo a suportar sistemas rádio oportunistas e avaliar as oportunidades tendo em consideração a potência emitida pelo rádio oportunista e o número de frequências licenciadas disponíveis.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo é dedicado às notas introdutórias e motivações que orientam este trabalho.

O segundo capítulo consiste numa revisão geral dos sistemas Rádio Cognitivo/Oportunista. Este capítulo inicia-se com uma secção dedicada ao problema da escassez de espectro, apenas para o enquadramento do tema central desta dissertação. De seguida, introduz-se o conceito lato e estrito de rádio cognitivo bem como as características e capacidades inerentes a cada um deles. Por último, apresentam-se sucintamente as várias técnicas e desafios da detecção de espectro, e descreve-se o cenário celular no qual incide este trabalho.

No terceiro capítulo são expostos os principais domínios da arquitectura do simulador de sistema. Apresentam-se as modificações efectuadas para a inclusão de sistemas rádio oportunistas. Descreve-se a abordagem considerada para o cálculo das perdas de canal L_o e ainda os modos de funcionamento implementados. O capítulo termina com a apresentação das métricas definidas para a avaliação das oportunidades de comunicação rádio oportunista.

O quarto capítulo centra-se na avaliação das oportunidades de comunicação. Inicialmente são enunciadas as condições e detalhes relacionados com a simulação sendo *a posteriori* apresentados e analisados os resultados obtidos pelas simulações. Os primeiros resultados apresentados referem-se ao modo estático de funcionamento, nomeadamente à probabilidade de comunicação. Posteriormente são apresentados os resultados inerentes ao modo dinâmico, tempo de comunicação, duração da oportunidade, duração da interferência e probabilidade de transição. Estas métricas são analisadas considerando várias frequências disponíveis e potências de emissão rádio oportunista.

Finalmente, o quinto capítulo dá conta das principais conclusões alcançadas ao longo do trabalho desenvolvido. Apontam-se ainda caminhos para investigações futuras no seguimento deste trabalho.

1.4 Contribuições

O presente trabalho pretende contribuir para o avanço do estado da arte de sistemas rádios oportunistas em bandas de frequência licenciadas, designadamente na caracterização das oportunidades de comunicação rádio oportunista em ambientes celulares UMTS.

Alguns resultados e decorrente avaliação das oportunidades de comunicação rádio oportunista desenvolvido neste trabalho foram publicados nos seguintes artigos de conferência:

- Artur Pereira, Atílio Gameiro, “Simulation-based Evaluation of Spectrum Opportunities in UMTS Cellular Networks” *16th IST Mobile & Wireless Communications Summit* (IST SUMMIT 2007), Budapeste, Hungria, Julho 2007.
- Artur Pereira, Joaquim Bastos, Paulo Marques, Atílio Gameiro, “Analysis of Communication Opportunities in UMTS Cellular Networks” *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (IEEE DySPAN 2007), Dublin, Irlanda, Abril 2007.
- Artur Pereira, Atílio Gameiro, “Opportunistic Radio and Licensed Users Coexistence in Cellular Networks” *International Symposium on Wireless Pervasive Computing* (ISWPC 2007), San Juan, Porto Rico, EUA, Fevereiro 2007.
- Artur Pereira, Helder Fontes, Atílio Gameiro, “Analysis of Spectrum Opportunities in Cellular Networks,” *Proceedings of the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications* (WPMC 2006), San Diego, CA, EUA, Setembro 2006.
- Artur Pereira, Helder Fontes, Atílio Gameiro, “Simulation Platform for Opportunistic Radio Systems,” *Proceedings of the 17th Annual IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (IEEE PIMRC 2006), Helsínquia, Finlândia, Setembro 2006.

2

Sistemas Rádio Oportunistas

Neste capítulo é identificado o principal problema da escassez de espectro e apresentado um conjunto de medidas que mostram a sua subutilização, medidas essas que motivaram o aparecimento da tecnologia Rádio Cognitivo. Na segunda secção deste capítulo é introduzido o conceito lato de Rádio Cognitivo, onde são discutidas as capacidades cognitivas e de reconfigurabilidade. O conceito estrito de Rádio Cognitivo é também parte integrante da segunda secção deste capítulo, na qual é efectuada uma revisão geral do estado da arte da tecnologia Rádio Oportunista. Na terceira e última secção são apresentadas as várias técnicas de detecção de espectro, utilizadas pelo rádio cognitivo para identificar buracos espectrais (oportunidades de comunicação), e ainda os principais desafios associados às mesmas. Por fim é apresentado o cenário celular no qual se avaliam as oportunidades de comunicação rádio oportunista.

2.1 Escassez de Espectro

O espectro electromagnético é um recurso único, universal e inesgotável disponível entre os 3 kHz e os 300 GHz. Quando as comunicações rádio foram inventadas, nos fins do século XIX, não existia nenhuma regulamentação em vigor que assegurasse uma utilização organizada do espectro. Como resultado, durante os primeiros anos, as bandas de espectro foram simplesmente ocupadas por utilizadores. Este cenário verificou-se até ao crescimento da Rádio, o qual conduziu a um desmedido uso do espectro resultando na intensificação dos problemas de interferência. Na tentativa de coordenar o uso do espectro a nível internacional, organizou-se em 1906 a primeira convenção internacional de Rádio. Após várias conferências, impulsionadas pelos militares e algumas entidades de radiodifusão, decidiu-se que a regulamentação e gestão do espectro seria da competência do governo de cada país.

O espectro rádio é visto como sendo um dos recursos com a regulamentação mais apertada de todos os tempos. Os reguladores nacionais, como a ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) em Portugal e a FCC (*Federal Communications Commision*) nos Estados Unidos da América, são responsáveis pelo uso eficiente do espectro (gestão espectral) e pelo licenciamento do espectro (regulamentação) nos seus domínios. Por forma a harmonizar o uso do

espectro, os reguladores nacionais coordenam as suas actividades a nível Europeu e a nível global através da ITU [13][14]. O principal papel dos reguladores é maximizar o bem-estar social criado pelo espectro ao longo dos anos, i.e. os reguladores têm de contrabalançar o interesse público no espectro e a viabilidade comercial dos operadores em fornecer aos consumidores uma elevada qualidade de serviço [15]. Por exemplo, investimentos demasiado elevados nas licenças reduzem a capacidade do operador em investir na rede, mas por outro lado desencoraja operadores candidatos menos sérios ou capazes.

Durante a última década a expansão dos serviços sem fios foi uma das tendências que mais contribui para o desenvolvimento do sector de Informação, Comunicação e Tecnologia (ICT). Todos os dispositivos sem fios, desde de telefones celulares a radares policiais bem como um simples portão de garagem controlado à distância dependem do acesso ao espectro electromagnético. Com o decorrer do tempo a importância deste recurso foi sendo cada vez mais valorizada à medida que as bandas de frequência associadas a aplicações específicas foram preenchendo o espectro utilizável. Posto isto, pode dizer-se que o espectro é um recurso que em face dos serviços rádio existentes e futuros vai tornar-se, ou já é, muito escasso, e essa escassez exige um aproveitamento muito eficiente deste recurso. No entanto, começa a haver alguma discussão no sentido de saber se essa escassez é real ou apenas aparente e causada pela política de regulamentação do espectro que tem vindo a ser seguida desde o início das comunicações rádio.

Os reguladores aplicam uma política de comando, controlo e atribuição rígida de licenças de espectro para serviços/operadores, ou seja, o espectro é atribuído a longo prazo aos detentores de licenças/serviços em regiões geográficas extensas. Como resultado, as bandas de frequências são exclusivamente licenciadas a utilizadores e cada sistema tem que operar numa banda de frequência limitada. Com uma grande parte do espectro preenchido torna-se difícil encontrar bandas livres para novos serviços ou mesmo para melhorar os já existentes.

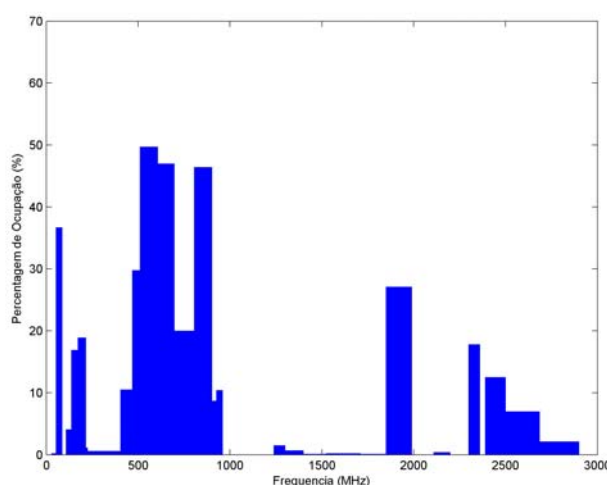


Figura 2-1 Ocupação espectral em cada banda – medidas efectuadas na cidade de Arlington, estado da Virgínia, EUA, Abril de 2004 [3]

Medidas efectuadas pela FCC – SPTF (*Spectrum Policy Task Force*) mostram que a maioria do espectro licenciado é usado esporadicamente [2]. Durante as medidas registaram-se variações temporais e geográficas no uso do espectro licenciado compreendidas entre os 15% e os 85%.

A Figura 2-1 ilustra o resultado das medidas de ocupação espectral, levadas a cabo pela SSC (*Shared Spectrum Company*), na cidade de Arlington durante o dia 16 de Abril de 2004 [3]. O local escolhido foi o telhado do edifício da NSF (*National Science Foundation*) com vista para a cidade de Washington, DC. As medidas foram efectuadas em todas as bandas desde os 30 MHz aos 3000 MHz. Baseado no resultado do estudo a SSC concluiu que apenas 11.4% das oportunidades espectrais, na frequência e no tempo, foram utilizadas na cidade de Arlington durante o dia 16 de Abril de 2004.

Na Figura 2-2 apresenta-se o resultado das medidas de ocupação espectral realizadas na cidade de Nova Iorque durante a Convenção Nacional Republicana de 30 de Agosto a 3 de Setembro de 2004 [4]. Esta localização, uma das áreas mais densamente povoadas dos Estados Unidos, e evento foram especificamente seleccionados para estudar a ocupação do espectro durante um período de elevada utilização de comunicações. As medidas foram efectuadas em todas as bandas desde os 30 MHz aos 3000 MHz.

Baseado no resultado do estudo a SSC concluiu que apenas 13% das oportunidades espectrais, na frequência e no tempo, foram utilizadas na cidade de Nova Iorque durante o pico das comunicações.

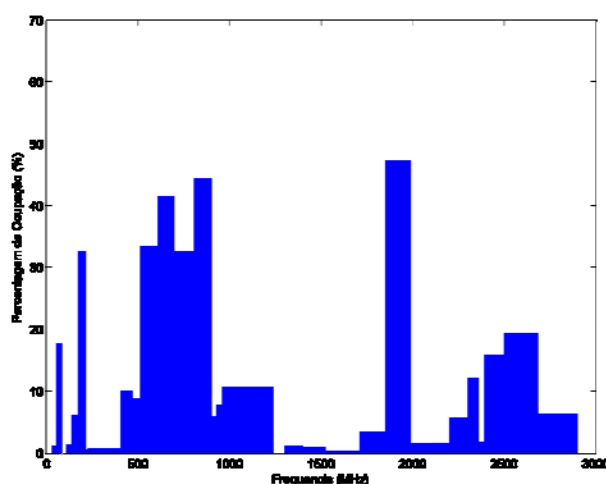


Figura 2-2 Ocupação espectral em cada banda – medidas efectuadas durante a Convenção Republicana de 2004 em Nova Iorque, EUA

A SSC efectuou também um conjunto de medidas na cidade de Vienna, estado da Virgínia durante os dias 15 e 16 de Dezembro de 2004 [5]. O local escolhido foi o telhado do escritório da SSC com vista para uma vasta área urbana, inclusive para a cidade de Washington, DC. Esta localização contém um conjunto de estruturas governamentais, superfícies comerciais, escolas, apartamentos, i.e. uma área com elevada utilização espectral.

A Figura 2-3 apresenta o resultado das medidas de ocupação espectral desde os 30 MHz aos 3000 MHz. Neste estudo a SSC concluiu que menos de 11.7% das oportunidades espectrais, na frequência e no tempo, foram utilizadas na cidade de Vienna durante os dias 15 e 16 de Dezembro de 2004.

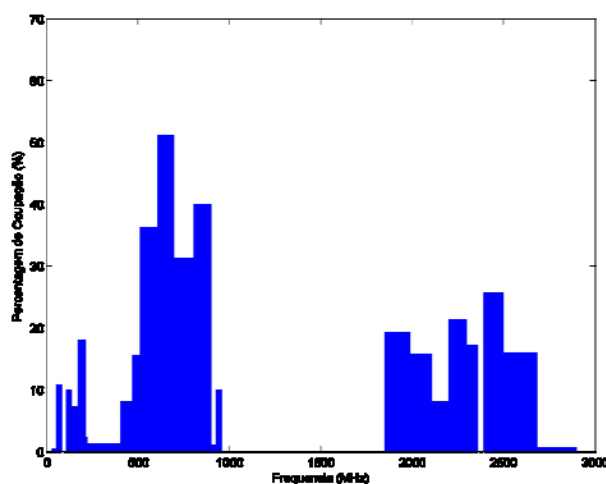


Figura 2-3 Ocupação espectral em cada banda – medidas efectuadas na cidade de Vienna, estado da Virgínia, EUA, Dezembro de 2004

Este conjunto de medidas demonstra que a ocupação do espectro está concentrada em determinadas bandas enquanto que as restantes, uma grande maioria, estão praticamente desocupadas. Para contornar este problema é necessário acabar com o paradigma de atribuição rígida de espectro que tem vindo a ser seguido desde o início das comunicações rádio. Embora, organismos de normalização e reguladoras nacionais estejam a conjugar forças nesse sentido, antevêm-se dificuldades já que não se mudam hábitos acumulados ao longo de 100 anos em meses.

Segundo os estudos efectuados existem oportunidades no tempo, na frequência e no espaço. Posto isto, é necessário desenvolver sistemas ágeis na frequência capazes de explorar dinamicamente as bandas subtilizadas. Neste âmbito a FCC produziu um relatório NPRM (*Notice of Proposed Rule Making* – FCC 03-322 [16]) adiantando a tecnologia rádio cognitivo como candidata para a partilha oportunística do espectro. Neste relatório da comissão a SPTF propõe um acesso secundário ao espectro já licenciado como forma de combater a escassez do espectro. No entanto, esta partilha de espectro deve ser realizada de modo controlado, por forma a que a operação dos utilizadores licenciados não seja comprometida. Mais ainda, um utilizador secundário (rádio cognitivo/oportunista) que tente aceder ao espectro deve considerar o impacto da sua transmissão na qualidade de recepção do utilizador licenciado.

Contudo, para que esta tecnologia vingue, será necessário provar e ter garantias irrefutáveis da sua viabilidade, de modo a que os organismos competentes acabem com um paradigma de 100 anos.

2.2 Rádio Cognitivo

O termo Rádio Cognitivo foi introduzido em [7] e [17] por Joseph Mitola III com base na seguinte definição,

“O termo rádio cognitivo identifica o ponto no qual um terminal sem fios e respectiva rede são suficientemente inteligentes acerca dos recursos rádio para,

- identificar as necessidades de comunicação dos utilizadores em função do contexto de utilização, e
- disponibilizar os recursos rádio e serviços sem fios mais apropriados para satisfazer essas necessidades.”

Assim, um rádio cognitivo tem a capacidade de seleccionar automaticamente o melhor serviço para uma determinada transmissão rádio e ainda, atrasar ou adiantar determinadas transmissões de acordo com a disponibilidade actual e iminente dos recursos rádio.

Em suma, o rádio cognitivo é um elemento chave para viabilizar soluções mais flexíveis de gestão do espectro rádio. Desde a sua introdução em 1999, o termo Rádio Cognitivo tem sido usado quer no sentido lato quer no sentido estrito.

2.2.1 Rádio Cognitivo no Sentido Lato

O rádio cognitivo no sentido lato, também conhecido por “rádio Mitola”, pode ser definido formalmente por [16][17],

Um “Rádio Cognitivo” é um rádio capaz de modificar os seus parâmetros de transmissão baseado na interacção com o ambiente em que opera.

A partir desta definição retiram-se as duas principais características do rádio cognitivo [12]:

- Capacidade Cognitiva

A capacidade cognitiva refere-se a agilidade da tecnologia rádio em capturar ou detectar a informação do seu ambiente rádio. Esta capacidade não é conseguida simplesmente pela monitorização da potência em algumas bandas de frequência de interesse. São necessárias técnicas mais sofisticadas no sentido de capturar as variações temporais e espaciais do ambiente rádio bem como evitar causar interferência nos outros utilizadores. Através desta capacidade as bandas de espectro desocupadas num determinado período de tempo ou localização podem ser identificadas. Consequentemente, pode ser seleccionada a melhor banda espectral tal como os parâmetros de funcionamento mais apropriados.

- Reconfigurabilidade

A capacidade cognitiva providencia o conhecimento do espectro e a reconfigurabilidade permite que o rádio seja programado dinamicamente consoante o ambiente rádio em que opera. Mais propriamente, o rádio cognitivo pode ser programado para transmitir e receber numa vasta gama de frequências bem como usar as diferentes tecnologias de acesso suportadas pelo seu hardware [18].

Em [7] e [17] o rádio cognitivo é definido como sendo uma extensão de um SDR (*Software Defined Radio*). Um SDR, como por exemplo o software embebido num telefone celular, define em tempo real os parâmetros sob os quais o telefone deve operar quando este se move de um lado para o outro. Em contraste, os parâmetros dos telefones celulares actuais são relativamente fixos em termos de banda de frequência e protocolo. Contudo, o rádio cognitivo é mais do que uma simples extensão de um SDR. O rádio cognitivo é um rádio que tem conhecimento do, pode “escutar” o, e aprender a partir do, ambiente em que opera, bem como executar acções que melhor servem as necessidades do seu utilizador [19].

Portanto, um dos objectivos do rádio cognitivo é usufruir das oportunidades espectrais através da capacidade cognitiva e reconfigurabilidade descritas anteriormente.

Uma vez que a maioria do espectro já se encontra atribuído, o desafio mais importante é partilhar o espectro licenciado sem interferir com a transmissão de outros utilizadores licenciados, como ilustra a Figura 2-4.

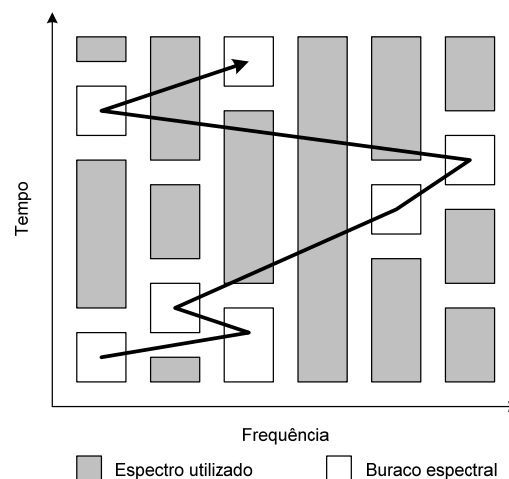


Figura 2-4 Conceito de buraco/oportunidade espectral

O rádio cognitivo tem a capacidade de utilizar o espectro temporariamente desocupado, o qual é denominado de *buraco espectral* ou *oportunidade* [12]. Se esta banda for posteriormente usada por um utilizador licenciado, o rádio cognitivo salta para outro buraco espectral, como ilustra a Figura 2-4, ou mantém-se na mesma banda, alterando o nível da sua potência de emissão ou esquema de modulação por forma a evitar interferir com os dispositivos licenciados.

Nas secções seguintes, são descritas as funções cognitivas e as capacidades de reconfigurabilidade da tecnologia rádio cognitivo.

2.2.1.1 Capacidade Cognitiva

A capacidade cognitiva de um rádio cognitivo permite a interacção em tempo real com o ambiente rádio envolvente. Desta forma, o rádio cognitivo determina os parâmetros de comunicação mais apropriados por forma a adaptar-se ao ambiente rádio adverso. Os passos necessários para uma operação de adaptação ao espectro não licenciado (aberto) estão ilustrados na Figura 2-5 [12][17], *ciclo cognitivo*. Nesta secção, apresenta-se uma visão global dos três principais passos do ciclo cognitivo: detecção espectral, análise espectral e decisão espectral. De salientar que a detecção espectral é abordada com mais detalhe na secção §2.3.1.

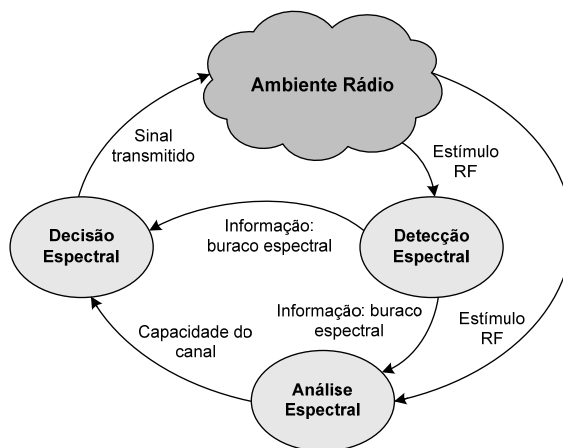


Figura 2-5 Ciclo cognitivo

Os passos do ciclo cognitivo apresentados na Figura 2-5 são os seguintes:

1. Detecção Espectral: O rádio cognitivo monitoriza as bandas espectrais disponíveis, captura as respectivas informações e detecta os buracos espectrais.
2. Análise Espectral: Estimação das características dos buracos espectrais identificados através da detecção espectral.
3. Decisão Espectral: O rádio cognitivo determina o débito de informação, o modo e a largura de banda de transmissão; depois, segundo as características espectrais e os requisitos dos utilizadores é escolhida a banda de espectro mais apropriada.

Uma vez determinada a banda espectral de operação, a comunicação pode iniciar-se. No entanto, o rádio cognitivo deve acompanhar constantemente as variações do ambiente rádio, dado este variar ao longo do tempo e do espaço. Se a actual banda espectral em uso ficar indisponível, uma função espectral de mobilidade é levada a cabo no sentido de disponibilizar uma transmissão sem interrupções.

Qualquer variação do ambiente rádio durante a transmissão bem como o aparecimento de um utilizador licenciado, o movimento de um utilizador ou variação do tráfego, pode afectar este ajuste.

2.2.1.2 Reconfigurabilidade

A reconfigurabilidade é a capacidade de ajustar em tempo real parâmetros de transmissão sem qualquer modificação nos componentes de hardware. Esta capacidade permite ao rádio cognitivo adaptar-se facilmente as adversidades do ambiente rádio. Existem vários parâmetros reconfiguráveis que podem ser incorporados no rádio cognitivo [16], como explicado de seguida:

- Frequência de Portadora

O rádio cognitivo tem a capacidade de alterar a sua frequência de portadora. Baseado na informação acerca do ambiente rádio, o rádio cognitivo pode determinar a frequência de operação mais conveniente, seguidamente, ajustar-se à mesma e finalmente comunicar.

- Modulação

O rádio cognitivo deve reconfigurar o seu esquema de modulação adaptativo aos requisitos do utilizador e as condições do canal. Por exemplo, no caso de aplicações sensíveis ao atraso, o débito de informação é mais importante que o débito de erros. Logo, o esquema de modulação que possui maior eficiência espectral deve ser seleccionado. Reciprocamente, as aplicações sensíveis a perdas, onde o débito de erros é mais importante que o débito de informação, necessitam de esquemas de modulação com baixos débitos binários de erros.

- Potência de Emissão

A potência de emissão do rádio cognitivo pode ser reconfigurada dentro dos limites de potência. O controlo de potência permite configurar dinamicamente a potência de emissão dentro dos limites de potência admissíveis. Caso não seja necessário um valor de potência tão elevado, o rádio cognitivo reduz a potência de emissão para um nível mais baixo, reduzindo a interferência e permitindo que mais utilizadores partilhem o espectro.

- Tecnologia de Comunicação

O rádio cognitivo pode também ser usado para disponibilizar interoperabilidade entre sistemas de comunicação diferentes.

Os parâmetros de transmissão de um rádio cognitivo podem ser reconfigurados não só no início da transmissão mas também durante a transmissão. Conforme as características do espectro, sempre que o rádio cognitivo comutar para uma banda de espectro diferente estes parâmetros são

reconfigurados, i.e. os parâmetros de emissão/recepção são reconfigurados e os protocolos de comunicação e esquemas de modulação mais apropriados são usados. Embora o termo Rádio Cognitivo tenha sido originariamente usado no sentido lato, actualmente é usado, na maioria das vezes, no sentido estrito.

2.2.2 Rádio Cognitivo/Oportunista no Sentido Estrito

O rádio cognitivo no sentido estrito, também conhecido por Rádio Oportunista, explora essencialmente o domínio da frequência no sentido de identificar e usar as melhores oportunidades espectrais de forma justa.

2.2.2.1 Estado da Arte

No seio da comunidade científica têm sido apresentados alguns trabalhos no âmbito da tecnologia rádio oportunista.

Ao nível Europeu, surge o recém iniciado projecto ORACLE (*Opportunistic Radio Communications in Unlicensed Environments*), no qual o Instituto de Telecomunicações - pólo de Aveiro integra o consórcio de oito parceiros. Este projecto enquadra-se na área de investigação rádio cognitivo, focando-se especificamente na definição, avaliação e demonstração de técnicas que explorem essencialmente a dimensão da frequência [20]. O projecto ORACLE procura contribuir para a realização da visão “Optimally Connected Anywhere, Anytime”. Assim sendo, o principal objectivo deste projecto passa por investigar, desenvolver, e validar conceitos, mecanismos e arquitecturas para rádios cognitivos e demonstrar as vantagens sócioeconómicas da utilização oportunista do espectro.

O ORACLE pretende abarcar as seguintes áreas e definir os mecanismos e conceitos necessários:

- Técnicas de Detecção

Adquirir informação relevante do ambiente rádio e definir o alcance (espectro) de operação possível.

- Processos de Tomada de Decisões

Possibilitar uma escolha inteligente de acesso ao espectro, baseada em políticas e espectro disponível, desocupado e subtilizado.

- Procedimentos de Optimização

Definir a forma de onda (espectro) mais adequada para uma determinada situação e ambiente rádio.

- Especificação de uma Arquitectura Ajustável do Terminal

Explorar as oportunidades espectrais em ambientes desconhecidos através da utilização de mecanismos baseados na cognição, no sentido de avaliar o melhor acesso ao espectro.

- Avaliação do Desempenho

Demonstrar as vantagens que o conceito rádio oportunista trará.

Através da disponibilização de novos mecanismos para uma utilização mais eficiente do espectro, o projecto ORACLE poderá ajudar os reguladores Europeus e organismos de normalização nas suas decisões futuras através de uma interacção activa.

Ainda ao nível Europeu, a investigação na área de sistemas rádio oportunistas tem sido desenvolvida na Universidade de Karlsruhe e tem como objecto de estudo uma arquitectura centralizada de exploração espectral baseada na modulação de multiportadoras (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [21][22]. O uso da técnica OFDM tem como vantagem permitir preencher as subportadoras ocupadas pelos utilizadores licenciados com zeros, resultando numa potência de emissão nula nessas subportadoras (evitando a interferência). Neste contexto é assumido que o rádio oportunista tem como suporte a tecnologia IEEE 802.11 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). O sistema rádio oportunista é constituído por uma estação base e várias estações móveis. Não é considerado qualquer alteração nos sistemas licenciados. A estação base difunde periodicamente tramas de detecção no sentido de detectar os utilizadores licenciados. Durante as tramas de detecção as estações móveis rádio oportunistas efectuem a detecção do espectro. Posteriormente, a informação de detecção é reunida na estação base rádio cognitiva. Seguidamente as estações móveis rádio oportunista modulam, na subportadora onde surge um utilizador licenciado, um símbolo complexo com a máxima potência. Através deste processo a estação base rádio oportunista recebe um sinal amplificado em todas as subportadoras com novos utilizadores licenciados.

Também foram desencadeadas iniciativas noutros países, nomeadamente nos Estados Unidos da América. Na Universidade de Berkeley está a ser desenvolvido o conceito “A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum” (CORVUS) [8][23]. Este conceito é de certa forma similar àquele proposto pela Universidade de Karlsruhe, no qual os rádios oportunistas podem arrendar o espectro dos utilizadores licenciados. No entanto, a proposta CORVUS vai mais além, já que o objectivo passa pela especificação de um sistema rádio oportunista completo cuja operação deverá cobrir uma gama de frequências das dezenas de MHz a alguns GHz. No projecto CORVUS, baseado na detecção local do espectro, a detecção de utilizadores primários e a alocação de espectro são realizadas de forma coordenada, i.e. um grupo de utilizadores forma um grupo de utilizadores secundários (SUG, *Secondary User Group*), onde cada membro “escuta” o espectro (dividido em subcanais).

Note-se que este esforço cooperativo aumenta consideravelmente a agilidade do sistema em identificar e evitar utilizadores primários.

Para que os rádios oportunista troquem informação de detecção e consequentemente sejam capazes de utilizar algoritmos distribuídos (para a decisão de oportunidades), são considerados dois tipos de canais lógicos:

- UCC (*Universal Control Channel*)

É o único canal conhecido por todos os rádios oportunista, serve para um rádio oportunista recém chegado detectar a existência de outros utilizadores e para ele próprio se anunciar.

- GCC (*Group Control Channel*)

Serve para disponibilizar dentro de um grupo a troca de informação e controlo de detecção entre rádios oportunistas.

Estes canais de controlo são encarados como sendo canais de baixo débito binário que podem estar localizados numa banda licenciada específica ou eventualmente usarem sinalização UWB (*Ultra Wide Band*).

Um projecto de igual importância, intitulado *Next Generation* (XG) [24], está a ser desenvolvido ao abrigo da agência DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). O projecto XG segue uma abordagem muito mais genérica e tenta definir uma linha de trabalho para desenvolver políticas baseadas em rádios inteligentes. O objectivo do XG é definir uma linha de trabalho completa para que os rádios possam aceder e usar o espectro dinamicamente numa vasta gama de frequências e em diferentes regiões geo-políticas. Para tal, é necessário que estes rádios incorporem mecanismos adaptativos (tempo real), por forma a aplicarem as políticas às diferentes situações. Por esse motivo espera-se que os rádios XG sejam mais ágeis em termos de políticas do que ágeis em termos de frequência. Neste âmbito, a separação entre políticas e procedimentos e entre procedimentos e protocolos é permitida usando dois conceitos chave; o uso de uma linguagem política e a definição de um procedimento abstracto. Segundo [24], a agilidade de um sistema XG em interpretar automaticamente uma política é crítica, ou seja, requer o desenvolvimento de uma linguagem universal no sentido de suportar máquinas com políticas não padronizadas.

Está neste momento em processo de normalização o primeiro standard mundial, IEEE 802.22, sustentado na tecnologia rádio oportunista [25][26]. Este projecto formalmente denominado de standard WRAN (*Wireless Regional Area Network*), baseia-se na construção de WRAN fixos (ponto-para-multiponto) que utilizarão bandas de TV UHF/VHF (Televisão - *Ultra High Frequency/Very High Frequency*) entre os 54 e os 862 MHz. Canais de TV específicos bem como bandas de guarda serão utilizados para comunicação.

O sistema IEEE 802.22 especifica um interface ar, sem fios, fixo ponto-para-multiponto, pelo qual a estação base gere a sua própria célula tal como todos os utilizadores a ela associada; denominados de consumidores de equipamentos locais (CPEs, *Consumer Premise Equipments*).

A estação base 802.22 gere uma única característica da detecção distribuída (informa a realização de medidas distribuídas aos vários CPEs). O sistema IEEE 802.22 tem como especificação uma eficiência espectral que varia na gama dos 0.5 bit/seg/Hz aos 5 bit/seg/Hz. A área de cobertura da estação base é a característica que distingue o IEEE 802.22 WRAN dos standard IEEE 802 já existentes. Esta pode ir além dos 100 km se a potência não for uma limitação. A cobertura especificada actualmente é de aproximadamente 33 km obtida com uma potência efectiva isotropicamente radiada (EIRP, *Effective Isotropic Radiated Power*) de 4 watts (CPE) [27]. O grupo de trabalho IEEE 802.22, formado em 2004, já finalizou a especificação dos requisitos técnicos. A primeira versão do standard IEEE 802.22 deverá estar concluída no início de 2007.

O projecto DIMSUMnet (*Dynamic Intelligent Management of Spectrum Ubiquitous Mobile Networks*) [28], implementa um acesso ao espectro estatisticamente multiplexado (SMA, *Statistically Multiplexed Access*) na banda de acesso coordenada (CAB, *Coordinated Access Band*). Enquanto a CAB aumenta a eficiência e equidade de acesso ao espectro, o SMA concentra-se em aumentar a utilização do espectro. A CAB é uma extensa parte de espectro contíguo reservado pelas autoridades reguladoras. O mediador espectral adquire e arrenda permanentemente a CAB segundo os pedidos. O DIMSUMnet usa um mecanismo de medição centralizado, ao nível das redes regionais, que tem como papel aumentar significativamente a utilização do espectro, reduzindo a complexidade e a agilidade do sistema. A estação base regista através do seu RAN-MAN (*Radio Access Network Manager*) designado quem negoceia o aluguer do espectro com um mediador SPIM (*Spectrum Information and Management*). Caso o aluguer seja bem sucedido, o RAN-MAN configura na estação base a banda de espectro alugada. De seguida, e para efeitos de configuração do cliente, a estação base envia a informação espectral, recebida do RAN-MAN, para os seus utilizadores. No sentido de caracterizar a viabilidade da CAB e do SMA, a utilização espectral do DIMSUMnet é medida nas redes CDMA (*Code Division Multiple Access*) e GSM (*Global System for Mobile Communications*) actuais [29]. O trabalho mais recente centra-se no preço do espectro e nas funções de alocação para os mediadores de espectro [30].

O projecto DRiVE (*European Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments*) enquadra-se na alocação dinâmica do espectro em redes heterogéneas, assumindo um canal comum de coordenação [31]. O projecto subsequente, OverDRiVE (*Spectrum Efficient Uni- and Multicast Over Dynamic Radio Networks in Vehicular Environments*) procura coordenar e “transformar” as redes UMTS já existentes numa rede híbrida, para garantir a eficiência espectral dos serviços multimedia móveis [32]. A alocação dinâmica do espectro (DSA, *Dynamic Spectrum Allocation*) temporal e espacial são dois aspectos investigados no DRiVE/OverDRiVE [33].

A DSA temporal permite que uma rede de acesso rádio (RAN, *Radio Access Network*) use o espectro que, num determinado momento, não esteja a ser utilizado por outras RANs. Por sua vez, a DSA espacial admite alocações espectrais para adaptar as flutuações regionais às exigências de tráfego. Obviamente, a eficiência destes esquemas DSA depende da agilidade em antever o tráfego da rede.

Muito embora estes projectos apresentem um enorme potencial para aumentar a eficiência espectral, a implementação do sistema de reconfiguração para a DSA temporal e espacial continua a ser um desafio ainda maior.

Em [34], é proposto uma rede rádio cognitivo baseada em OFDM (OCRA, *OFDM-based Cognitive Radio*). A rede OCRA considera os ambientes rádios da rede XG e desenvolve operações de *cross-layer* para o acesso dinâmico ao espectro. A arquitectura da rede OCRA providencia um novo conceito de gestão espectral baseado em OFDM. Suportado na estrutura da sua camada física é proposto uma estrutura comum de partilha espectral de modo duplo que permite aceder as redes existentes e coordenar os rádios cognitivo. Além disso é proposto um novo paradigma de encaminhamento que considera juntamente o reencaminhamento e o espectro *handoff*. Mais ainda, para oferecer uma elevada qualidade de comunicação, as redes OCRA introduzem técnicas de transporte multiespectro no sentido de explorar a disponibilidade do espectro não contíguo.

Em [34], é também proposto um banco de testes para a avaliação e integração da rede OCRA. O banco de testes OCRA baseia-se na tecnologia IEEE 802.11 a/g, a qual explora a tecnologia OFDM. Ademais, é desenvolvido uma unidade cognitiva de detecção autónoma para emular as capacidades do rádio cognitivo em efectuar a detecção do espectro.

Existem diferenças consideráveis entre as arquitecturas das várias propostas, todavia são justificadas pelos seus próprios objectivos:

A proposta da Universidade de Karlsruhe é uma solução dedicada que pretende aumentar a capacidade do IEEE 802.11, razão pela qual a arquitectura é desenvolvida em torno da pilha protocolar desta norma. Esta arquitectura é centralizada, i.e. os controlos do ponto de acesso, os nós e os mecanismos de detecção do espectro actuam como um centro de fusão de informação reunindo as medidas efectuadas pelos nós. Importa salientar que estes últimos também tomam as decisões sobre as oportunidades espectrais e organizam adequadamente as transmissões.

No sistema CORVUS, é assumido que a transmissão é ponto-a-ponto. Assim, os rádios oportunistas podem aceder a uma infra-estrutura fixa através de um ponto de acesso dedicado ou comunicarem entre si no modo *ad-hoc*. O desenho dos rádios oportunista CORVUS envolve somente as camadas 1 (física) e 2. Comparando com a camada física de uma pilha protocolar convencional a principal diferença reside na inclusão da função de detecção espectral. O desempenho das camadas físicas e de ligação são avaliados através do banco de testes CORVUS [35].

Além disso, é proposto um protocolo seguro de manutenção de ligação dentro do CORVUS por forma a garantir a qualidade de comunicação dos utilizadores secundários [36].

Dada a sua abrangência a arquitectura do XG contempla um vasto conjunto de possibilidades tais como, *ad-hoc* centralizada com capacidade de detecção em cada nó ou centralizada com capacidade de detecção somente num ponto de acesso central. Em termos de pilha protocolar a funcionalidade XG é vista como um processo da camada 2, a camada física é apenas considerada para implementar um controlo mínimo. Embora alguns dos pedidos MAC (*Medium Access Control*) possam implicar acções XG específicas, está bem presente que algumas das peças fundamentais do XG estão na camada física (ex.: detecção espectral), as quais requerem considerações acerca do *cross-layer*.

Ainda que de forma incompleta, tem sido desenvolvido algum trabalho em aspectos específicos relacionados com comunicações rádio oportunista.

Por um lado, na Universidade de Rutgers [37] está a ser investigado o uso de algoritmos genéticos para a componente de “aprendizagem” do rádio cognitivo.

Por outro lado, na Universidade da Virgínia [11] são investigados algoritmos de acesso ao espectro baseados em resultados teóricos. No que diz respeito a algoritmos de detecção, algumas ideias que usam ferramentas de processos cicloestacionários e de análise espectral estão actualmente a serem propostas [12].

Ao nível industrial, algumas empresas (Intel, Qualcomm, Texas Instruments) têm comunicado em diversas apresentações [38][39][40] a existência de programas internos de investigação relacionados com o desenvolvimento de terminais e sistemas rádio cognitivo. Embora até a presente data não tenham sido apresentados muitos resultados específicos.

Ao nível comercial, a AutoCell [41] desenvolveu uma extensão da norma IEEE 802.11 através de um algoritmo distribuído que envolve um conjunto de pontos de acesso. Estes últimos “escutam” o ambiente rádio, seleccionam as bandas e utilizam a potência apropriadamente. Ainda que um sistema operativo distribuído que envolve somente os pontos de acesso no processo de tomada de decisão não possa ser denominado de sistema rádio cognitivo, representa um primeiro passo no desenvolvimento de produtos comerciais que possibilitam o uso mais eficiente do espectro.

Esta análise sobre as investigações e projectos actuais e passados demonstra, com a excepção das iniciativas ORACLE, CORVUS e XG, que o actual estado da arte é de certa forma pobre e pouco consistente.

É patente que os diferentes grupos de investigação têm como tendência focar um tópico específico sem um esforço significativo na definição e integração de soluções que irão combinar todos os aspectos necessários para a construção de um terminal rádio cognitivo.

2.3 Principais Desafios

2.3.1 Detecção Espectral

Um requisito importante das redes rádio cognitivo é identificar os buracos/oportunidades espectrais. Tal como explicado na secção §2.2, o rádio cognitivo é desenhado para ter o conhecimento, e ser sensível as variações, do ambiente rádio. As funções de detecção espectral permitem, através da identificação de buracos espectrais, que o rádio cognitivo se adapte ao ambiente rádio. A forma mais eficiente de identificar buracos no espectro é detectar, dentro do alcance de comunicação de um rádio cognitivo, os utilizadores licenciados que estejam a receber dados. No entanto, é de facto difícil para um rádio cognitivo obter uma medida directa do canal entre um emissor e um receptor primário; razão pela qual, o trabalho de investigação mais recente centrar-se na observação local dos utilizadores secundários para detecção de utilizadores primários.

Duma maneira geral, as técnicas de detecção espectral podem ser classificadas como detecção localizada, detecção cooperativa e detecção baseada na interferência, como ilustra a Figura 2-6.

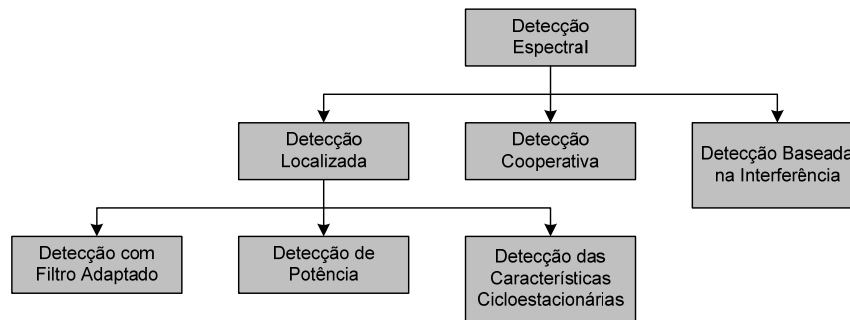


Figura 2-6 Classificação das técnicas de detecção espectral

Nas secções seguintes, são descritos estes métodos de detecção espectral para redes rádio cognitivas e discutidos os tópicos de investigação em aberto nesta área.

2.3.1.1 Detecção Localizada (detecção não cooperativa)

O rádio cognitivo deve distinguir entre bandas espectrais usadas e bandas espectrais livres. Posto isto, o rádio cognitivo deve ser capaz de determinar se o sinal de um emissor primário está presente/ausente numa determinada banda de espectro. A técnica de detecção localizada baseia-se na detecção do sinal (fraco) proveniente de um emissor primário através da observação local dos utilizadores. O modelo básico para a detecção localizada pode ser definido por [6]

$$x(t) = \begin{cases} n(t) & H_0 \\ h s(t) + n(t) & H_1 \end{cases}, \quad (2-1)$$

onde $x(t)$ é o sinal recebido pelo utilizador secundário, $s(t)$ é o sinal transmitido pelo utilizador primário, $n(t)$ é o ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) e h o ganho de amplitude do canal. H_0 é uma hipótese nula, indica a ausência de sinal primário (sinal do utilizador primário) numa determinada banda de espectro. Por sua vez, H_1 é uma hipótese alternativa, que indica a presença de sinal primário.

Segundo o modelo de hipóteses [42], são usados três esquemas para a detecção localizada. De seguida são apresentadas as técnicas de *detecção com filtro adaptado*, *detecção de potência* e *detecção das características cicloestacionárias* propostas para a detecção localizada nas redes rádio cognitivo. Refira-se, a título de curiosidade, que existe um estudo recente sobre detecção espectral de canais de banda larga baseado em *wavelets* [43].

Detecção com Filtro Adaptado

Quando a informação do sinal primário é conhecida no utilizador secundário, o detector óptimo em ruído Gaussiano estacionário é o filtro adaptado, já que maximiza a relação sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) [42]. A principal vantagem do filtro adaptado é a capacidade de alcançar elevados ganhos de processamento, necessitando para isso de menos tempo. No entanto, requer que o utilizador secundário tenha o conhecimento prévio do sinal primário (inviável do ponto de vista prático), nomeadamente, o tipo de modulação, a forma do impulso e o formato do pacote. Evidentemente, se essa informação não for exacta o desempenho do filtro adaptado é pobre.

Detecção de Potência

Caso o receptor não reúna informação suficiente acerca do sinal primário, por exemplo, se o receptor apenas conhecer a potência do ruído Gaussiano aleatório, o detector óptimo é o detector de potência [42]. No sentido de medir a potência do sinal recebido, o sinal de saída do filtro passa-banda, com largura de banda W , é elevado ao quadrado e integrado sob o intervalo de observação T . Finalmente, a saída do integrador Y é comparada com um limiar λ para decidir se o utilizador primário está presente ou ausente [44]. Se a detecção de potência puder ser aplicada num ambiente sem desvanecimento, a probabilidade de detecção P_d e falso alarme P_f são dadas por [44]

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_m\left(\sqrt{2\gamma_{\text{SNR}}}, \sqrt{\lambda}\right), \quad (2-2)$$

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(m, \lambda, \lambda)}{\Gamma(m)}, \quad (2-3)$$

onde γ_{SNR} é a SNR alvo, $u = TW$ é o produto tempo largura de banda, $\Gamma(\cdot)$ e $\Gamma(\cdot, \cdot)$ são as funções gama completa e incompleta, respectivamente e $Q_m(\cdot, \cdot)$ a função de Marcum.

Segundo as funções (2-2) e (2-3), uma baixa P_d resulta no aumento da interferência causada no utilizador primário e uma elevada P_f resulta numa reduzida utilização espectral, visto que os falsos alarmes aumentam o número de oportunidades desperdiçadas.

Os trabalhos mais recentes na detecção de utilizadores primários têm adoptado o detector de potência [42][45]. Em [6] são considerados os factores de desvanecimento lento e multipercurso para o detector de potência.

Neste caso, P_f é independente de Γ , quando h varia devido ao desvanecimento, P_d devolve a probabilidade de detecção condicionada pela SNR instantânea, escrita por

$$P_d = \int_x Q_m(\sqrt{2\gamma_{\text{SNR}}}, \sqrt{\lambda}) f_\gamma(x) dx, \quad (2-4)$$

onde $f_\gamma(x)$ corresponde a função probabilidade de distribuição da SNR sob desvanecimento.

Todavia, o desempenho do detector de potência é susceptível a variabilidade de potência do ruído. Para resolver este problema é usado, em [42], um piloto no emissor primário por forma a melhorar a precisão do detector; implica alterações nos sistemas incumbentes, uma vez mais inviável do ponto de vista prático. Outra limitação é o facto do detector de potência não distinguir os tipos de sinais (detecta unicamente a presença de sinais). Assim sendo, e devido aos sinais indesejados, o detector de potência tem tendência para falsa detecção.

Detecção das Características Cicloestacionárias

Um método alternativo de detecção, é a detecção baseada nas características cicloestacionárias [46][47][48]. Os sinais modulados são geralmente conjugados com portadoras *seno*, sequências de treino, códigos de espalhamento, sequências de salto ou prefixos cíclicos. Como resultado, obtêm-se sinais com periodicidade embebida. Um sinal modulado é caracterizado como cicloestacionário desde que a sua média e auto-correlação exibam periodicidade. Estas características são detectadas pela análise da função de correlação espectral.

A principal vantagem da função de correlação espectral é a capacidade de distinguir a potência do ruído da potência do sinal modulado, já que o ruído é um sinal estacionário sem correlação e os sinais modulados, cicloestacionários têm correlação espectral devido à periodicidade embebida no sinal. Assim, um detector de características cicloestacionárias pode revelar-se mais eficiente do que o detector de potência, em termos de discriminação do ruído, graças à sua robustez à variabilidade de potência do ruído [48]. Em [49] demonstra-se que através de um detector cicloestacionário é possível detectar um sinal UMTS TDD fraco, SNR=-15dB, mantendo a probabilidade de detecção igual a 98%, mesmo tendo em conta o desvanecimento lento e multipercurso. Conquanto, esta técnica é computacionalmente complexa e requer tempos de observação significativamente longos.

Para um desempenho mais eficiente e preciso, é proposto em [47] um esquema de detecção melhorado que combina análise espectral cíclica com padrões de reconhecimento baseado em redes neurais. Através da análise espectral cíclica são extraídas características distintas do sinal recebido, representadas pela função de coerência espectral e pela função densidade de correlação espectral. Seguidamente, a rede neuronal classifica os sinais em diferentes tipos de modulação.

2.3.1.2 Detecção Cooperativa

Na detecção de sinais primários assume-se que a localização dos receptores primários é desconhecida, devido à ausência de sinalização entre utilizadores primários e secundários. Ora, o utilizador secundário baseia-se exclusivamente nos sinais primários obtidos pela observação local dos utilizadores primários [50][51]. Note-se que, na maioria dos casos, não há interacção entre a rede secundária e a rede primária, dado estarem fisicamente separadas¹.

Deste modo e utilizando um detector localizado, o utilizador secundário não consegue evitar a interferência com os receptores primários, devido à falta de informação sobre os mesmos, tal como ilustra a Figura 2-7(a). Além disso, o modelo de detecção localizada é incapaz de prevenir o problema do terminal escondido. Segundo a Figura 2-7(b) um emissor secundário pode estar em linha de vista com um receptor primário, mas pode não ser capaz de detectar o emissor devido ao desvanecimento lento. Consequentemente, é necessária a informação de detecção dos outros utilizadores secundários para uma detecção mais exacta.

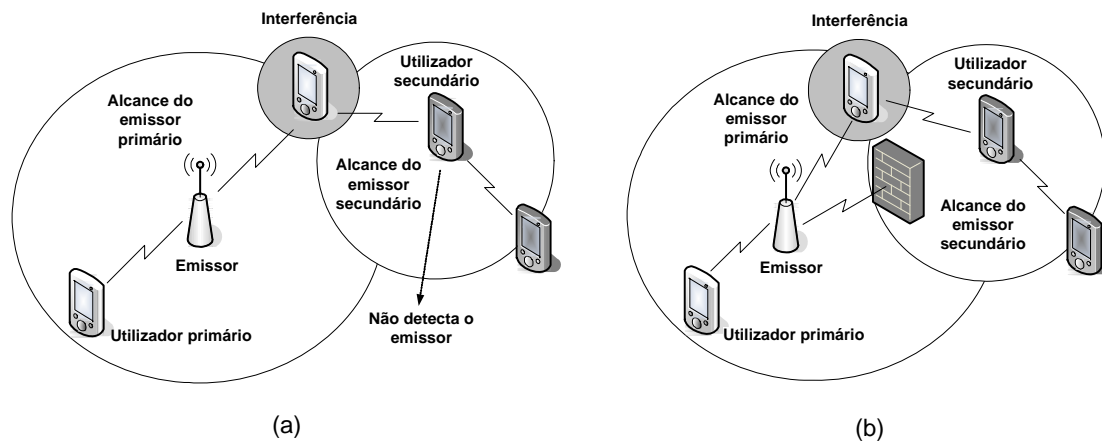


Figura 2-7 Problema da detecção localizada: (a) receptor e (b) desvanecimento lento

Na detecção não cooperativa explicada na secção §2.3.1.1, o utilizador secundário detecta independentemente o sinal primário através das suas observações locais.

¹ Isso poderia ser alvo de outra classificação de detecção cooperativa: cooperação inter-rede.

A detecção cooperativa recorre a métodos de detecção espectral onde a informação de detecção de vários utilizadores secundários é incorporada na detecção de utilizadores primários.

A detecção cooperativa pode ser implementada quer de forma centralizada, quer de forma distribuída [45][52]. No método centralizado a estação base secundária tem como papel reunir a informação de detecção de todos os utilizadores secundários e identificar buracos no espectro. Por sua vez, as soluções distribuídas requerem troca de observações entre utilizadores secundários.

A detecção cooperativa entre utilizadores secundários é teoricamente mais precisa desde que a incerteza na detecção de um único utilizador seja minimizada [6].

Os efeitos de desvanecimento lento e multipercurso são os principais factores que degradam o desempenho dos métodos de detecção de utilizadores primários [35]. Contudo, esquemas de detecção cooperativa permitem mitigar os efeitos de desvanecimento lento e multipercurso, i.e. aumentam a probabilidade de detecção em ambientes rádio caracterizados por desvanecimentos profundos [6].

Em [53] é investigada a limitação das propostas de detecção espectral cooperativa. Geralmente a transmissão de dados e as funções de detecção localizam-se no mesmo dispositivo secundário. Este tipo de arquitectura pode resultar numa decisão espectral subótima devido a possibilidade de conflito entre a transmissão de dados e a detecção. Por forma a contornar este problema são montadas, em [53], duas redes separadas e distintas, i.e. *rede de detecção* para detecção cooperativa do espectro e a *rede operacional* para a transmissão de dados. A rede de detecção montada na área desejada escuta o espectro. A informação espectral reunida pelos sensores é processada por um controlador central que cria o mapa de ocupação espectral para as redes operacionais. Por sua vez, a rede operacional usa esta informação para decidir sobre a disponibilidade do espectro.

Embora as aproximações cooperativas apresentem melhores desempenhos em termos de qualidade de detecção, estas causam efeitos adversos nos recursos das redes, devido às operações adicionais e ao elevado tráfego. Além de que, o problema da falta de informação sobre a localização do receptor primário continua por resolver. Na secção seguinte, são explicados os métodos de detecção baseados na interferência.

2.3.1.3 Detecção Baseada na Interferência

A interferência é regulada segundo uma abordagem centralizada no emissor, i.e. o emissor controla a interferência através da potência radiada, das emissões fora da banda e da localização de emissores individuais. De salientar que a interferência é causada nos receptores como apresenta a Figura 2-7(a) e (b). Por isso, a FCC [54] introduziu um novo modelo para a medição de interferência denominado “temperatura de interferência”.

A Figura 2-8 apresenta o modelo de temperatura de interferência.

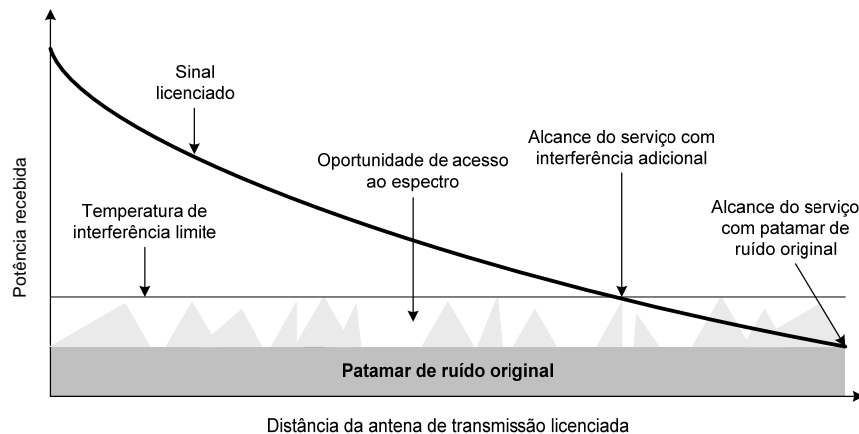


Figura 2-8 Modelo de temperatura de interferência [54]

O modelo ilustra o sinal de uma estação rádio projectada para operar numa área onde a potência recebida aproxima o nível do patamar de ruído. O aparecimento de um sinal de interferência adicional leva ao aumento do patamar de ruído em vários pontos da área de serviço, como indicam os picos acima do patamar de ruído original. Ao contrário da abordagem tradicional centralizada no emissor, o modelo de temperatura de interferência gere a interferência no receptor através da temperatura de interferência limite, representada pela interferência adicional tolerável pelo receptor. Por outras palavras, o modelo de temperatura de interferência considera a potência RF (Rádio Frequência) acumulada, proveniente de múltiplas transmissões, e estabelece um patamar máximo (limite). Os utilizadores secundários poderão usar esta banda espectral enquanto as suas transmissões não excederem este limite.

No entanto, existem algumas limitações em medir a temperatura de interferência. Em [55] a interferência é definida como sendo uma fracção esperada de utilizadores primários com serviços interrompidos, devido as operações dos utilizadores secundários. Este método considera factores como o tipo de modulação do sinal não licenciado, antenas, agilidade em detectar canais licenciados activos, controlo de potência e níveis de actividade dos utilizadores licenciados e não licenciados. Além disso, este modelo descreve a interferência causada por um único utilizador secundário e não considera o efeito de múltiplos utilizadores secundários. Mais ainda, neste método, caso os utilizadores secundários desconheçam a localização do utilizador primário mais próximo, a interferência não pode ser calculada.

Em [56] é apresentado um método de detecção directa do receptor, onde a fuga de potência do oscilador local emitida pelo andar RF do receptor primário é explorada para a detecção de utilizadores primários. Por forma a detectar a fuga de potência do oscilador local, sensores de baixo custo podem ser montados próximos dos receptores primários. O nó de sensores detecta a fuga de potência do oscilador local e posteriormente essa informação é usada pelos utilizadores secundários no sentido de determinarem a banda de espectro utilizada pelo utilizador primário.

2.3.1.4 *Desafios da Detecção Espectral*

Existem vários desafios em aberto que precisam de ser estudados para o desenvolvimento de funções de detecção do espectro.

- *Medição da Temperatura de Interferência*

A dificuldade deste método de detecção peca efectivamente na medição da temperatura de interferência. Um utilizador secundário é naturalmente conhecedor do seu nível de potência de emissão tal como da sua localização exacta, através de um sistema GPS (*Global Positioning System*). Dado que os utilizadores primários são geralmente dispositivos passivos, o utilizador secundário pode não conhecer a localização exacta do utilizador primário e consequentemente não ser capaz de medir ou estimar a temperatura de interferência no mesmo. Evidentemente, se o utilizador secundário não for capaz de medir o efeito da sua transmissão em todos os possíveis receptores, não é possível obter uma medida de temperatura de interferência útil.

- *Detecção do Espectro em Redes Multiutilizador*

As redes rádio cognitivo baseiam-se geralmente num cenário multiutilizador que consiste em múltiplos utilizadores primários e secundários. Além disso, redes rádio cognitivo próximas umas das outras podem competir pela mesma banda de espectro. No entanto, os modelos de interferência actuais [54][55] não consideram o efeito de múltiplos utilizadores secundários. O cenário multiutilizador dificulta a detecção de utilizadores primários bem como a estimação da interferência. Por este motivo as funções de detecção espectral devem ser desenvolvidas considerando a possibilidade de um cenário multiutilizador/rede. Note-se que os esquemas de detecção cooperativa podem ser considerados para explorar a diversidade espacial inerente a rede multiutilizador.

- *Capacidade de Detecção*

Um dos principais requisitos das redes rádio cognitivo é a detecção de utilizadores primários num curto espaço de tempo [42][57]. Dado que as redes rádio cognitivo baseadas em OFDM são aquelas que mais se ajustam à arquitectura física rádio cognitivo [48], a detecção multiportadora pode ser explorada e o tempo total de detecção reduzido. Isto porque, desde que seja detectado um utilizador numa portadora, a detecção nas restantes portadoras é dispensável. Em [48] é proposto um algoritmo de detecção de potência para redes rádio cognitivo baseadas em OFDM. É demonstrado que o tempo total de detecção é reduzido através da reunião de informação da cada portadora. Embora, para tal seja necessário um número elevado de portadoras, aumentando desta forma a complexidade do projecto. Por isso, é necessário que novos algoritmos de detecção espectral sejam desenvolvidos de forma a que o número de amostras

necessárias para detectar o utilizador primário seja minimizado para uma dada probabilidade de erro de detecção.

2.4 Cenário Celular

A razão para usar rádios oportunistas em redes celulares prende-se com a possibilidade de tirar partido das oportunidades existentes num determinado espaço, tempo ou frequência, sem pôr em causa as comunicações dos utilizadores celulares licenciados. Segundo a Figura 2-9, o standard com capacidades rádio oportunistas arrenda e explora a banda licenciada primária.

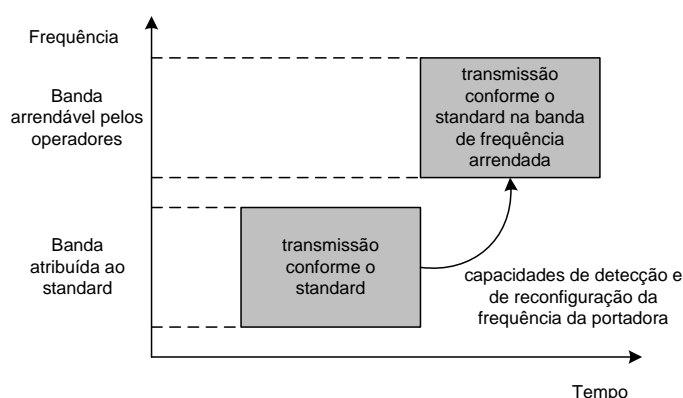


Figura 2-9 Arrendamento de bandas seleccionadas oportunisticamente

É altamente questionável se esta abordagem é praticável do ponto de vista jurídico. Novos moldes de atribuição de espectro, que permitam que as bandas licenciadas sejam arrendadas por diferentes standard, poderão ser úteis para a realização desta proposta.

2.4.1 Rádios Oportunistas em Redes Celulares

Neste contexto, considera-se para o sistema celular primário o standard UMTS FDD. Esta escolha é motivada pelo facto das frequências 3G do espectro rádio terem-se tornado num recurso dispendioso em vários países. Assim, a utilização oportunista destas bandas pode traduzir-se em mais uma forma de receita para os proprietários das licenças. Para o sistema rádio oportunista considera-se um sistema celular centralizado baseado no standard UMTS TDD, com capacidades adicionais de detecção e de reconfiguração da frequência de portadora (i.e. comutação para as frequências do UMTS FDD).

O UMTS FDD usa um par de bandas, uma para o sentido ascendente da ligação (UL, *Uplink*) e outra para o sentido descendente da ligação (DL, *Downlink*). O UMTS FDD é concebido para aplicações de alta mobilidade em ambientes macrocelulares com débitos de dados acima dos 384kbit/s. Devido à natureza das aplicações baseadas na Internet os padrões de tráfego são

assimétricos, dado que a quantidade de informação de controlo é insignificante comparada com a quantidade de informação descarregada. Apesar da muito menor utilização da banda de *uplink*, que resulta num desperdício de espectro rádio muito valioso, optou-se por analisar as oportunidades nas bandas de frequências usadas no sentido descendente da ligação, ou seja, analisa-se o pior caso (mais tráfego, menos oportunidades).

Assim, um sistema rádio oportunista baseado no standard UMTS TDD que tira proveito das oportunidades nas bandas UMTS FDD, pode aumentar a capacidade global do sistema UMTS. Há um conjunto de razões para usar o standard UMTS TDD com capacidades adicionais de detecção e de reconfiguração da frequência de portadora para operações celulares rádio oportunistas,

- O UMTS TDD é um standard já estabelecido. Na realidade, mais de 120 operadores móveis na Europa e na Ásia têm espectro especificamente atribuído para a tecnologia 3G TDD, ex.: o IPMobile (Japão) utiliza o standard UMTS TDD [58].
- É mais simples introduzir capacidades adicionais num standard já estabelecido do que desenhar todo um novo sistema de comunicação. Esta abordagem é usada pelo grupo de trabalho IEEE 802.22 que propõe como sistema rádio oportunista o sistema WiFi, o qual geralmente opera nas bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), com capacidades adicionais de detecção de, e comutação para, canais de televisão UHF/VHF livres [59].
- O modo UMTS TDD suporta o sentido ascendente e descendente da ligação na mesma banda de frequência, adaptando-se perfeitamente quer na banda ascendente quer na banda descendente do UMTS FDD.
- O rádio oportunista e o utilizador primário operam de forma não exclusiva usando a técnica de acesso CDMA. Deste modo, e devido à ortogonalidade entre os códigos de espalhamento, o receptor primário CDMA pode rejeitar parte da interferência oriunda do rádio oportunista.

A Figura 2-10 ilustra o conceito proposto neste trabalho. Note-se que há um canal UMTS FDD DL onde o rádio oportunista UMTS TDD detecta uma oportunidade e acomoda uma capacidade extra.

Os princípios básicos do sistema proposto são os seguintes:

1. O espectro licenciado é partilhado pelos utilizadores primários e pelos rádios oportunistas,
2. os rádios oportunistas não interferem, prejudicialmente, com os utilizadores primários,

ou seja, ao garantir que o 2º princípio básico do sistema é cumprido, o regulador permite que sistemas rádio oportunistas operem sob redes celulares licenciadas.

O utilizador primário é definido como sendo o proprietário da banda de frequência licenciada. Os utilizadores primários não têm conhecimento da existência de rádios oportunistas, isto é, os utilizadores primários e os rádios oportunistas não trocam informação entre si. Por último, os utilizadores primários não necessitam de nenhuma sinalização em especial para acederem ao seu espectro.

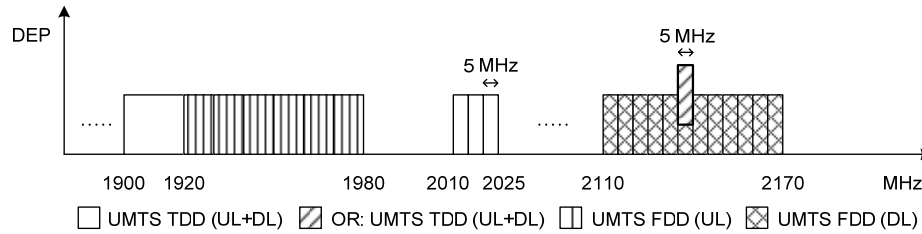


Figura 2-10 Utilização oportunista da banda de frequência UMTS FDD DL

Por outro lado, o rádio oportunista é uma entidade que pretende adquirir o espectro não utilizado pelos utilizadores primários para a sua própria comunicação. Os rádios oportunistas necessitam de sinalização para acederem ao espectro licenciado não utilizado.

Caso um utilizador primário abandone o sistema, i.e. ultrapasse a zona limítrofe da célula, é introduzido um novo utilizador primário. Desta forma, garante-se que o número de utilizadores primários presentes no sistema é sempre K . Nesta situação, mesmo que o rádio oportunista esteja a comunicar na frequência f_i , o novo utilizador primário introduzido na célula assume que a frequência está disponível e inicia a sua transmissão sem informar o rádio oportunista (uma vez que não há troca de informação entre UPs e ROs).

De acordo com o 2º princípio básico do sistema, o rádio oportunista pode usar a frequência licenciada f_i desde que não interfira, prejudicialmente, com os utilizadores primários, i.e. a relação sinal interferência dos utilizadores primários deve estar acima de um dado limiar, $\gamma_{\text{(dB)}}$.

A relação sinal interferência, SIR (*Signal-to-Interference Ratio*, em literatura anglo-saxónica), é dada pela razão entre a potência do sinal recebido e a potência da interferência. Deste modo, o limite máximo de interferência tolerável para o utilizador primário n é dado por, $P_r(n)/\gamma(n)$, onde P_r denota a potência recebida pelo utilizador primário n e γ o limiar de relação sinal interferência. Antecipe-se que, neste trabalho, o limite máximo de interferência é igual para todos os utilizadores primários, uma vez que se assume controlo perfeito de potência no sentido descendente da ligação e $\gamma(1...K) = \gamma$.

Antes de iniciar qualquer actividade o rádio oportunista deve estimar a interferência que a sua transmissão pode causar em cada um dos utilizadores primários presentes no sistema. O rádio oportunista deve repetir esta medição periodicamente, em cada instante de tempo t_q , e

interromper de imediato a sua transmissão caso a condição $SIR > \gamma_{(dB)}$ não seja satisfeita. Posto isto, através do cálculo da SIR de cada utilizador primário, o rádio oportunista classifica a sua interferência como tolerável ou intolerável, e com base nessa classificação o rádio oportunista toma uma posição, comunicar ou não comunicar.

Tal como referido anteriormente, o cenário sob análise baseia-se num sistema celular oportunista UMTS TDD que opera sob uma rede celular licenciada UMTS FDD, como representado na Figura 2-11.

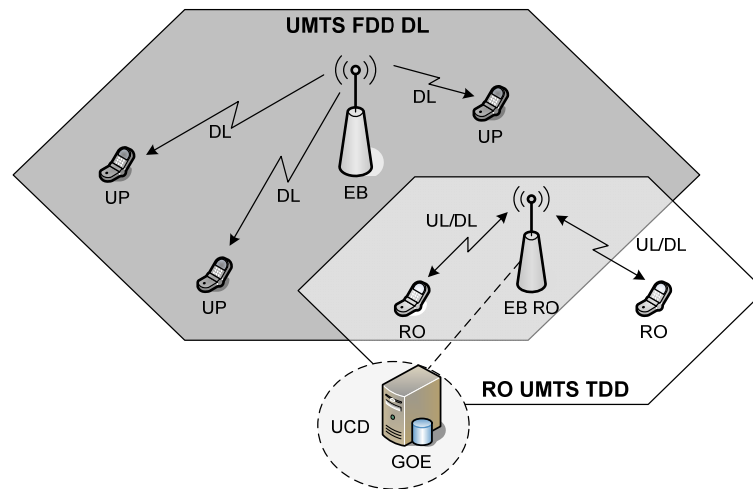


Figura 2-11 Rádios oportunistas UMTS TDD em redes celulares primárias UMTS FDD

O cenário considerado neste trabalho assume que o sistema celular oportunista utiliza uma arquitectura centralizada, a qual controla a alocação do espectro e o procedimento de acesso dos rádio oportunistas. Assume ainda que existe uma entidade abstracta que tem o conhecimento da SIR mínima para cada utilizador primário $\gamma(1...K)$, da posição de cada utilizador primário e da potência recebida em cada uma dessas posições, $P_r(1...K)$. Refira-se que, os rádios oportunistas enviam periodicamente as suas localizações² para a entidade abstracta. Por último, existe uma Unidade Central de Decisão (UCD) que troca informação com a entidade abstracta. Ora, com base nas posições dos utilizadores primários e dos rádios oportunistas, a entidade abstracta devolve o canal de propagação real entre cada rádio oportunista e cada utilizador primário. Através da informação periódica proveniente da entidade abstracta, a unidade central de decisão calcula a relação sinal interferência em cada utilizador primário e verifica a condição $SIR > \gamma_{(dB)}$. A unidade central de decisão recorre a algoritmos de Gestão de Oportunidades Espectrais (GOE) para

² Os rádios oportunistas incorporam um dispositivo de posicionamento global (GPS).

decidir a frequência a usar, a potência de emissão permitida ou eventualmente ordenar uma comutação de frequência ou o fim da transmissão.

Tal como ilustra a Figura 2-11, considera-se que a estação base primária UMTS FDD comunica com os utilizadores primários, portanto no sentido descendente da ligação (DL, *Downlink*). Por sua vez, os rádios oportunistas comunicam com a estação base rádio oportunista e vice versa, ou seja, no sentido ascendente (UL, *Uplink*) e descendente da ligação, respectivamente. Posto isto, os elementos da rede heterogénea susceptíveis a interferência são,

- utilizadores primários
 - interferência oriunda da emissão dos ROs;
 - interferência oriunda da emissão da estação base (EB) RO;
- rádios oportunistas
 - interferência oriunda da emissão da EB primária;
- estação base rádio oportunista
 - interferência oriunda da emissão da EB primária;

O trabalho desta dissertação incide apenas na protecção dos utilizadores primários contra a interferência proveniente da emissão rádio oportunista, i.e. apenas a interferência causada pela comunicação ascendente do sistema celular oportunista UMTS TDD é considerada. Logo, a rede heterogénea reduz-se à estação base primária, utilizadores primários e rádios oportunistas, como ilustra a Figura 2-12. O estudo efectuado enquadra-se com o cenário “detecção de oportunidades de desvanecimento”, isto é, as oportunidades são geradas pelas perdas de propagação e pelo desvanecimento lento entre o rádio oportunista e cada utilizador primário.

Segundo a Figura 2-12, existem N sistemas celulares sobrepostos numa área geográfica que operam nas bandas $f_1 \dots f_N$.

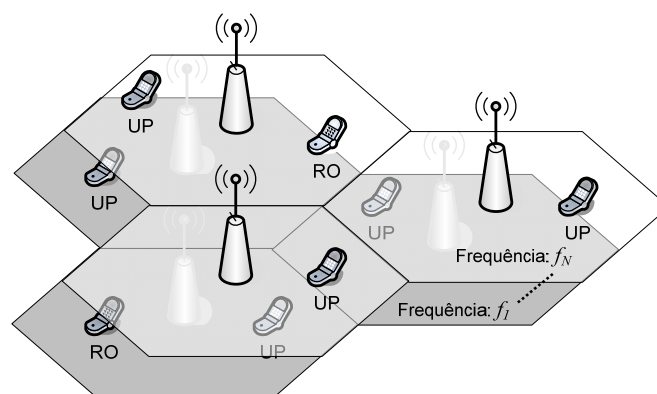


Figura 2-12 Redes celulares heterogéneas

O terminal rádio oportunista procura bandas de frequências disponíveis no espectro rádio e explora-as dinamicamente, ajustando o seu nível de potência de emissão no sentido de manter a SIR de cada utilizador primário acima de um dado limiar. Refira-se, a título informativo, que o desenho dos receptores rádio oportunistas constitui um considerável desafio; como as emissões dos dispositivos primários não são controláveis, os dispositivos rádio oportunistas devem usar desenhos de rádios avançados, tal como o detector multiutilizador, no sentido de lidar com a interferência e assegurar que os sinais desejados sejam correctamente descodificados.

Como o espectro partilhado é acedido de forma não exclusiva, a potência de emissão máxima permitida depende das perdas do canal entre o rádio oportunista e cada utilizador primário. Assim, e por forma a obter uma estimativa fiável da potência máxima permitida para cada par frequência/posição, o rádio oportunista deve incorporar características de detecção e alguns esquemas cooperativos com as redes primárias. Note-se que, ao considerar a potência de emissão rádio oportunista constante, simplifica-se por um lado a implementação mas aumenta-se por outro lado o número de transições da frequência de portadora do rádio oportunista.

Uma das formas de ilustrar as oportunidades de comunicação numa determinada área de cobertura, onde existem N sistemas celulares licenciados, passa pelo cálculo dos mapas de interferência. Os mapas de interferência proibida/permitida correspondem às regiões da célula, na qual existem N sistemas primários, onde a transmissão rádio oportunista é proibida/permitida para um instante de tempo t_q , como representa a Figura 2-13.

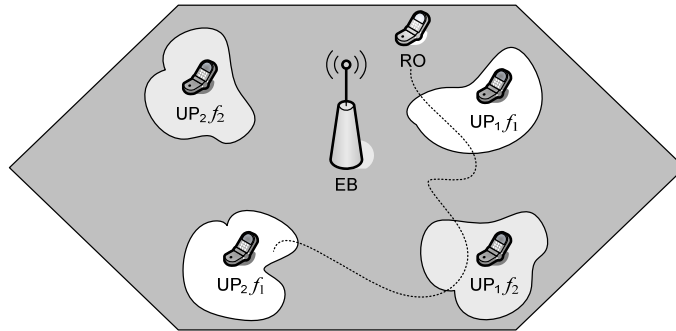


Figura 2-13 Sobreposição dos mapas de interferência para $N=2$

No exemplo da Figura 2-13, existem dois utilizadores primários activos em cada uma das frequências licenciadas disponíveis, f_1 e f_2 , e um rádio oportunista que percorre o caminho representado na respectiva figura. Refira-se ainda que, os utilizadores primários estão fixos e os mapas de interferência obtidos para o instante de tempo t_q são válidos para $q=1 \dots \infty$.

Segundo a Figura 2-13, as regiões representadas em torno de cada utilizador primário representam os mapas de interferência proibida. Logo, a zona mais escura da célula representa a região onde o rádio oportunista pode transmitir quer na frequência f_1 , quer na frequência f_2 .

Antes de entrar na zona proibida da frequência f_1 (região mais clara), o rádio oportunista deve comutar automaticamente para a frequência f_2 e vice-versa quando este se aproximar da zona proibida da frequência f_2 , no sentido de evitar interferir de forma prejudicial com os utilizadores primários.

A responsabilidade de manter os rádios oportunistas fora das “regiões proibidas” está a cargo da unidade central de decisão (UCD), localizada na estação base rádio oportunista. A UCD utiliza a informação periódica proveniente da entidade abstracta para criar os mapas de interferência e com base nos mesmos, decidir.

Ao nível de sistema, independentemente dos algoritmos ou dos protocolos usados, o recurso às simulações é indispensável para avaliar a capacidade e impacto das redes rádio oportunistas nos sistemas licenciados; isto porque a avaliação em cenários realistas é demasiado complexa para ser suportada por modelos teóricos simples e porque o desenvolvimento de bancos de testes físicos é dispendioso e, na maioria dos casos, pouco flexível. Com a agravante das comunicações rádio estarem ainda mais limitadas devido aos desafios legais associados às políticas do espectro. Assim sendo, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de simular a coexistência entre um sistema secundário rádio oportunista e sistemas celulares licenciados.

A plataforma de simulação baseia-se num simulador de sistema UMTS FDD, com modificações por forma a suportar sistemas rádio oportunistas UMTS TDD. O simulador de sistema considera que existem N sistemas celulares numa área geográfica que operam nas bandas de frequência $f_1 \dots f_N$. Sob essa mesma área existe uma rede de rádios oportunistas, com permissão para utilizar qualquer uma das N bandas de frequência, cuja comunicação tem prioridade secundária, ou seja, o rádio oportunista pode transmitir na banda f_i desde que não degrade o desempenho dos utilizadores celulares licenciados activos nessa banda. Com base nas estatísticas obtidas através de simulações definem-se métricas que caracterizam essencialmente o cenário, de modo a que um sistema real possa ser projectado através da optimização das mesmas.

3

Plataforma de Simulação

Os simuladores permitem realizar testes de sistemas a baixo custo e com uma maior capacidade de repetição que por exemplo os testes de campo não permitem. A simulação não é mais que uma representação de uma parte de um sistema real por intermédio da construção de modelos computacionais.

A necessidade de analisar as oportunidades espectrais nas redes celulares levou à alteração do simulador de sistema MOTION (*Mobile Systems Communication Group*) [60] por forma a que ambos os sistemas, licenciados e oportunistas, pudessem coexistir.

Um simulador de sistema dinâmico suporta a mobilidade do utilizador, modelos de medida, algoritmos de *scheduling* temporal, embora exista um forte compromisso entre a frequência de amostragem e o tempo de simulação. O simulador de sistema é portanto o mais apropriado para avaliar o desempenho dos sistemas rádio oportunistas e permitir uma análise ao nível de oportunidades de comunicação. Nestes moldes, a concepção do simulador de sistema deverá ser suficientemente completa no propósito de fornecer modelos com alguma precisão, enquanto se mantém o tempo de simulação e o excesso de complexidade num nível aceitável.

Neste capítulo são apresentadas e descritas as especificações e propriedades do simulador de sistema baseado no HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) do UMTS. O simulador foi concebido usando linguagem de programação de alto nível C++. Ainda neste capítulo, descreve-se a abordagem considerada para o cálculo das perdas de canal entre o rádio oportunista e o utilizador primário bem como os modos de funcionamento implementados. O capítulo finda com a apresentação das métricas definidas para a avaliação das oportunidades de comunicação rádio oportunista em redes celulares UMTS.

3.1 *Arquitectura do Simulador*

O simulador de sistema proporciona uma plataforma comum para avaliar o impacto de uma interface rádio UMTS/HSDPA no desempenho ao nível de sistema para redes baseadas numa arquitectura de comutação de pacotes. A plataforma simula o sentido descendente da

comunicação e suporta serviços de pacotes que incluem alocação de recursos adaptativa, baseada numa política de *scheduling* que funciona de forma conjunta com a camada física e de rede.

Os blocos de maior interesse da arquitectura do simulador de sistema são definidos na Figura 3-1. Os principais blocos que são comuns ao simulador de sistema, para sistemas baseados em comutação de pacotes, são agrupados em categorias específicas (domínios). A terminologia destes grupos reflecte a abstracção da funcionalidade dos blocos representados na arquitectura do simulador.



Figura 3-1 Arquitectura do simulador de sistema

Nas secções seguintes apresentam-se os vários domínios do simulador de sistema.

3.1.1 Domínio da Coordenação de Tarefas

O domínio de coordenação de tarefas é responsável pela coordenação global da operação e funcionamento do sistema. Como tal, esta entidade define o modo como as diferentes entidades do sistema interagem durante a simulação. A entidade de coordenação de tarefas é a essência de toda a hierarquia do simulador. Responsável por toda a coordenação e funcionamento da simulação, a entidade coordenação de tarefas é a única entidade de interligação entre as diferentes entidades do simulador e o programa principal, a partir do qual a simulação é executada.

O gerador de eventos gere o processo de entrada de utilizadores no sistema, realizado na etapa de inicialização do simulador. É ainda responsável pelo armazenamento e extracção de qualquer evento que possa ou deva ocorrer durante a simulação.

A entidade de coordenação de tarefas realiza, basicamente, quatro tarefas principais: a construção da simulação com base nos parâmetros de configuração de entrada, a execução da simulação, geração de resultados e “destruição” da simulação.

3.1.2 Domínio da Interação Humana

O domínio de interação humana define a interface com o utilizador. Esta entidade permite o acesso ao ficheiro de inicialização da simulação por forma a efectuar a configuração dos parâmetros de entrada da referida simulação. O simulador possui um ficheiro de configuração com toda a parametrização variável associada à simulação. No início de cada simulação o ficheiro em questão é lido por parte da entidade coordenadora de tarefas.

3.1.3 Domínio de Resultados

O domínio dos resultados é a entidade responsável por armazenar, gerir e processar os resultados obtidos durante a simulação. É pois uma entidade relativamente importante uma vez que define a informação extraída das simulações.

A entidade de resultados disponibiliza mecanismos que armazenam de forma apropriada os dados das outras entidades que constituem o simulador, para posterior extracção e análise.

3.1.4 Domínio do Problema

O domínio do problema está relacionado com o conjunto de entidades associadas à modelação dos efeitos do sistema real e portanto fazem parte da estrutura central do simulador. Esta estrutura central representa o modelo de sistema, composto por um gerador de tráfego de pacotes, baseado em modelos do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), mecanismos de alocação dinâmica de recursos, modelos de canal e mecanismos de distribuição de estações base e móveis.

A Figura 3-2 ilustra o modelo de sistema.

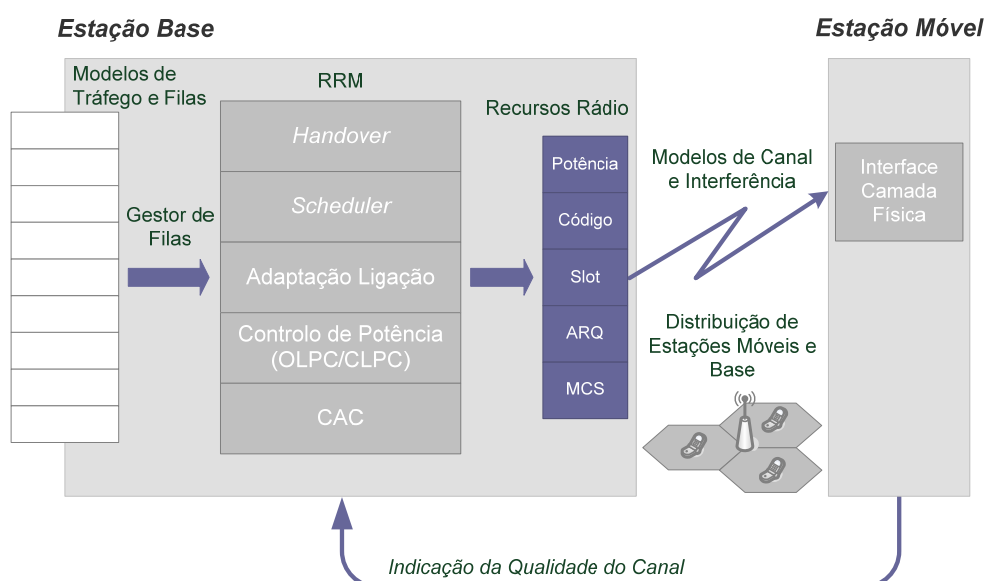


Figura 3-2 Modelo de sistema

O cenário apresentado na Figura 3-2 retrata um sistema de comunicações móveis acessido por múltiplos utilizadores, no qual, uma entidade centralizada (*scheduler*) controla a transmissão da informação (acesso ao meio) no sentido descendente da ligação, para os diferentes utilizadores que requerem serviços da rede.

Nas secções seguintes abordam-se algumas das funcionalidades associadas ao modelo de sistema (sub-blocos do domínio problema).

3.1.4.1 Cenário Celular

Em termos do cenário celular, considera-se um esquema de células com geometria hexagonal e antenas omnidireccionais, como representa a Figura 3-3. Por forma a reduzir o tempo de simulação, opta-se por uma abordagem de célula central. Quer isto dizer que as células vizinhas são utilizadas simplesmente para gerar interferência intercelular no sentido descendente da ligação; o número de utilizadores por célula vizinha é suficientemente elevado para que se possa considerar o pior cenário, i.e. estações base a transmitir à máxima potência.

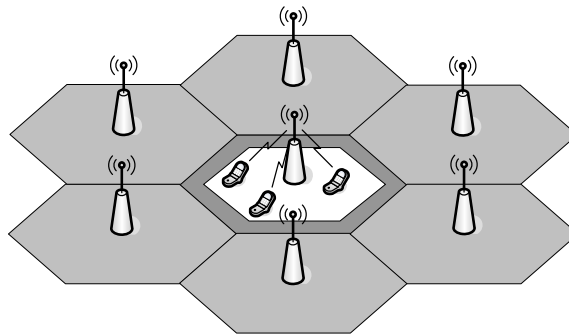


Figura 3-3 Representação do cenário celular

Importa referir, que todos os utilizadores que entram no sistema, distribuídos uniformemente, são servidos pela célula central.

3.1.4.2 Modelo de Canal

A entidade referente ao modelo de canal tem como função modelar as três componentes que constituem o canal rádio: perdas de propagação, desvanecimento lento e desvanecimento rápido.

Modelo de Perdas de Propagação

As perdas de propagação representam a variação do valor médio de potência do sinal recebido em função da distância do emissor. As perdas provocadas pela propagação no canal rádio dependem da frequência do sinal transmitido. As perdas de propagação são geradas segundo o modelo *COST-Walfisch-Ikegami* [61] aplicado a cenários urbanos. Este modelo é válido para a banda de frequência dos 800 aos 2000 MHz e para distâncias compreendidas entre $20\text{ m} < d < 5\text{ km}$.

A separação entre edifícios considerada é de 30 metros, largura das estradas de 15 metros, altura dos edifícios de 30 metros e um ângulo de chegada das reflexões nos edifícios de 90 graus. As alturas para as estações base e móvel são de 30 e 1.5 metros, respectivamente. Nestes termos, as perdas de propagação, em dB, entre a estação base e o utilizador primário n vêm definidas por

$$PL(n) = 73.24 + \left(24.5 - \frac{1.5f_c}{925} \right) \log_{10} f_c + 38 \log_{10} d, \quad (3-1)$$

onde f_c denota a frequência de portadora em MHz e d a distância em km entre a estação base e o utilizador primário n .

Substituindo a frequência de portadora por 2000 MHz, obtém-se

$$PL(n) = 143.4 + 38 \log_{10} d. \quad (3-2)$$

Modelo de Desvanecimento Lento

A uma determinada distância do emissor, devido à obstrução provocada pelos objectos existentes no meio de propagação, ocorrem variações em torno do valor médio da atenuação. Este efeito é designado por desvanecimento lento (*shadowing*, em literatura anglo-saxónica).

O desvanecimento lento depende do tamanho dos objectos bem como da estrutura do material.

No início de cada simulação é gerado o desvanecimento lento bidimensional, ou seja, no instante t_0 , o desvanecimento lento $SH(n)$, em dB, entre a estação base e o utilizador primário n , localizado em (x_n, y_n) , é dado pela soma de duas variáveis

$$SH(n) = \sqrt{0.5} \times (F_0(x_n, y_n) + F_j(x_n, y_n)), \quad (3-3)$$

onde F_0 e F_j representam funções espaciais geradas usando o método descrito em [62].

Em [62] é derivado um modelo de simulação de canal bidimensional para o processo de desvanecimento lento com base no método de soma de sinusóides.

As funções espaciais F_0 e F_j têm uma distribuição Gaussiana com média μ (zero), desvio padrão σ (desvio padrão do desvanecimento lento) e correlação espacial

$$R(d) = e^{-\ln(2) \times \frac{d}{D}}, \quad (3-4)$$

onde D corresponde à distância de decorrelação espacial do desvanecimento lento e d à distância entre dois pontos da célula (distância entre a posição do UP_n no instante t_{q-1} e a posição do UP_n no instante t_q , para $q > 0$). Saliente-se que o desvanecimento lento é log-normal.

Portanto, a variação lenta de potência recebida no utilizador primário n , i.e. desvanecimento lento $SH(n)$, no instante t_q , onde $q \in \mathbb{N}^*$, vem traduzida por

$$SH(n) = \sqrt{1 - R(d)^2} \times X + R(d) \times SH_{old}(n), \quad (3-5)$$

onde $SH(n)$ corresponde ao desvanecimento lento no instante t_q e $SH_{old}(n)$ ao desvanecimento lento no instante t_{q-1} . Note-se que X define uma variável com distribuição Gaussiana, $N(\mu, \sigma)$, de média μ (zero) e desvio padrão σ (desvio padrão do desvanecimento lento). Refira-se que em dB, uma variável Gaussiana corresponde a uma variável log-normal.

Os valores do desvio padrão σ e da distância de decorrelação espacial D , para um cenário urbano, estão definidos na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Parâmetros do desvanecimento lento

Cenário Urbano	
Parâmetros do Modelo	Valores
σ	8 dB
D	50 m

O diagrama de blocos ilustrado na Figura 3-4, representa o cálculo do desvanecimento lento no instante t_q , para $q > 0$.

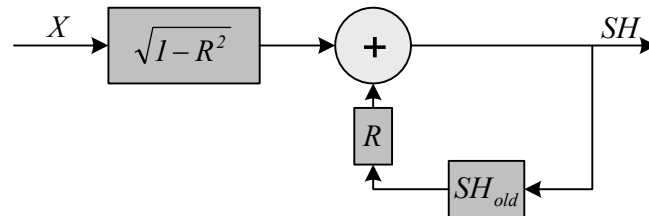


Figura 3-4 Diagrama de blocos referente ao cálculo do desvanecimento lento

Modelo de Desvanecimento Rápido

Na propagação multipercurso as componentes percorrem diferentes distâncias e sofrem várias reflexões. As fases relativas dos sinais recebidos variam com a mobilidade do utilizador. Dependendo das fases relativas dos sinais, eles podem interferir construtivamente ou destrutivamente dando origem a variações rápidas na potência do sinal (*fastfading*, em literatura anglo-saxónica).

A componente de desvanecimento rápido é modelada pelo simulador de sistema, em cada intervalo de tempo de transmissão, para cada estação móvel e para cada canal entre a estação móvel e cada uma das células vizinhas.

O desvanecimento rápido é gerado usando o modelo modificado de Jakes para a geração rápida das componentes independentes de Rayleigh [63]. O modelo baseia-se na geração de componentes (multipercurso) independentes com amplitudes que seguem uma distribuição de Rayleigh, obtidas através da sobreposição de sinais sinusoidais com frequências e fases iniciais diferentes. A frequência de portadora e a velocidade do móvel são utilizadas para definir as estatísticas do desvanecimento.

O canal de desvanecimento multipercurso baseia-se no modelo ITU veicular A. Importa referir que, por motivos de complexidade computacional, este modelo é apenas utilizado na célula central. As células vizinhas, estações interferentes, são modeladas por um desvanecimento plano designado na literatura de *flatfading*, i.e. uma única componente multipercurso com potência média igual a 1.

Os valores relativos dos atrasos e das amplitudes do canal ITU veicular A são apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 Atrasos e amplitudes das componentes multipercurso do modelo ITU veicular A

ITU veicular A Velocidade 30km/h (VA30)	
Atraso (η s)	Amplitude (dB)
0	0
310	-1.0
710	-9.0
1090	-10.0
1730	-15.0
2510	-20.0

3.1.4.3 Modelo de Interferência

Considere-se um utilizador primário UP_n localizado na célula da estação base EB. A potência recebida no utilizador primário n , $P_r(n)$, proveniente da estação base, é definida por

$$P_r(n) = \frac{P(n) \times G_{EB} \times G_{UP}(n)}{L_{EB} \times L_{UP}(n) \times L(n)}, \quad (3-6)$$

onde $P(n)$ representa a potência emitida pela estação base para o utilizador primário n . G_{EB} e $G_{UP}(n)$ representam o ganho das antenas da estação base e do utilizador primário n , respectivamente. L_{EB} representa as perdas nos cabos da estação base e $L_{UP}(n)$ as perdas corporais do utilizador primário n . $L(n)$ corresponde as perdas do canal entre a estação base e o utilizador primário n ; dadas pela contribuição das perdas de propagação e do desvanecimento lento e rápido, ou seja,

$$L(n) = \frac{10^{\frac{PL(n)}{10}} \times 10^{\frac{SH(n)}{10}}}{10^{\frac{FF}{10}}}. \quad (3-7)$$

O nível de potência de interferência recebido pelo utilizador primário n , fruto das contribuições intra- e intercelular é dado por

$$I(n) = \alpha_c \times I_{intra}(n) + I_{inter}(n), \quad (3-8)$$

onde α_c representa o factor de ortogonalidade e $I_{inter}(n)$ a interferência intercelular no utilizador primário n .

A interferência intracelular no utilizador primário n , $I_{intra}(n)$, causada pela comunicação da estação base com os $K-1$ utilizadores primários, é definida por

$$I_{intra}(n) = \sum_{j=1, j \neq n}^K P(j) \frac{G_{EB} \times G_{UP}(n)}{L_{EB} \times L_{UP}(n) \times L(n)}. \quad (3-9)$$

A interferência intercelular no utilizador primário n , causada pelas N_{EB} estações base vizinhas, é dada por

$$I_{inter}(n) = \sum_{b=1}^{N_{EB}} P_v(b) \frac{G_v(b) \times G_{UP}(n)}{L_v(b) \times L_{UP}(n) \times L_v(b, n)}, \quad (3-10)$$

onde P_v , G_v e L_v correspondem respectivamente à potência de emissão, ao ganho da antena e as perdas nos cabos da estação base vizinha b . L_v corresponde as perdas do canal entre a estação base vizinha b e o utilizador primário n .

Com base nas expressões anteriores pode determinar-se a relação sinal interferência no utilizador primário n através de

$$SIR(n) = \frac{P_r(n)}{I(n) + NF \times N_0 \times W}, \quad (3-11)$$

onde NF denota a figura de ruído do utilizador primário n , N_0 a densidade espectral de potência do ruído aditivo e W a largura de banda do sinal.

O valor da SIR é actualizado em todos os intervalos de tempo de transmissão, T_{ti} . Os valores de SIR são usados para determinar a probabilidade de sucesso das transmissões dos pacotes, através do canal. A probabilidade de sucesso é extraída de tabelas *look-up* de valores de SIR versus BLER (*Block Error Rate*), obtidas de simulações realizadas ao nível da camada física.

3.1.4.4 Modelo de Mobilidade

Modelos típicos de mobilidade são implementados de forma a modelar o movimento do utilizador primário em cenários urbanos. Parâmetros associados com a mobilidade incluem a velocidade, probabilidade de mudança de direcção, etc. O modelo de mobilidade é representado por um objecto autónomo na estrutura do simulador que pode ser invocado sempre que a determinação da mobilidade seja necessária. Note-se que a mobilidade está associada ao ambiente de simulação. Três ambientes são incluídos no simulador de sistema, o ambiente *indoor*, o ambiente urbano e o ambiente rural com velocidades do móvel de 3, 30 e 120 km/h, respectivamente.

O modelo de mobilidade para o ambiente urbano baseia-se num modelo de mobilidade pseudo-aleatório com trajectórias semi directas. A posição dos móveis é actualizada segundo a distância de descorrelação e a direcção pode ser alterada, em cada uma dessas actualizações, segundo uma determinada probabilidade. No ambiente urbano, a velocidade dos móveis considerada é constante e igual a 30 km/h, a probabilidade de mudar de direcção na actualização de posição é de 0.4 e o ângulo máximo na actualização de direcção é de 45°.

Refira-se que os utilizadores primários são distribuídos uniformemente na célula e que as suas direcções são aleatoriamente escolhidas aquando da inicialização da simulação.

3.1.4.5 Interface com a Camada Física

O sistema apresentado é concebido apenas para transmissões de dados no sentido descendente da ligação. A camada física baseia-se numa interface UMTS FDD.

No sentido de simular o desempenho de um sistema real é necessário considerar todas as camadas protocolares da rede: camada física, camada MAC e camadas superiores. Contudo, a integração de todas as camadas num simulador tornar-se-ia bastante complexa e os tempos de simulação demasiado extensos. Por conseguinte, o simulador de sistema modela o desempenho da ligação rádio, ao nível da camada física, por intermédio de uma interface apropriada entre o sistema e a camada física, definida através de tabelas de correspondência entre valores de SIR e BLER (tabelas *look-up*).

3.1.4.6 Modelos de Tráfego

O modelo para tráfego de voz baseia-se no modelo *on-off*,

- Os períodos de *on-off* são exponencialmente distribuídos com valores médios de 1 e 1.35 segundos, respectivamente;
- Durante os períodos de *on* a fonte gera um CBR (*Constant Bit Rate*) de 11.04 kbps, o que significa que um pacote de 552 bit é gerado de 25 em 25 tramas.

O modelo para tráfego de dados rege-se pelo modelo de tráfego *Web* proposto e especificado pela 3GPP. As principais características são,

- Um valor de pico para o débito binário de 384 kbps durante uma chamada de dados (*packet call*); o que equivale a um intervalo de tempo médio entre a chegada de cada pacote de 10.4 ms.
- Durante uma chamada são gerados pacotes de acordo com um processo de *Poisson*, com um valor médio de 25 pacotes. O tamanho dos pacotes obedece a uma distribuição de *Pareto* com valor médio de 480 *bytes*.
- O intervalo de tempo entre as chamadas, D_{pc} , segue uma distribuição exponencial com média de 412 segundos.

3.1.4.7 Esquema ARQ

Utiliza-se um esquema simples de ARQ (*Automatic Repeat-reQuest*) para serviços de dados. Assume-se que os pacotes IP (*Internet Protocol*) de tamanho variável são transformados em pacotes de tamanho fixo na camada RLC (*Radio Link Control*), por intermédio de operações de segmentação, concatenação e *padding*. Note-se que depois de segmentado o pacote IP é mapeado de acordo com a política de alocação de recursos.

Os pacotes errados que chegam ao receptor são retransmitidos pela estação base. Na recepção as várias versões recebidas do pacote são combinadas (*chase combining*) de forma a recuperar a informação transmitida.

Na camada física são transmitidos, simultaneamente numa trama, vários pacotes de diferentes utilizadores.

3.1.4.8 Alocação Dinâmica de Recursos

A unidade de alocação dinâmica de recursos representa a unidade que inclui as funcionalidades de *scheduling* associadas à camada MAC. Esta unidade inclui também a modulação e codificação adaptativa, p canais H-ARQ (*Hybrid ARQ*) paralelos, algoritmos de *handover* e controlo de admissão de utilizadores.

3.2 Inclusão de Sistemas Rádio Oportunistas

Tal como referido na secção §2.4.1 existem N sistemas celulares numa área geográfica que operam nas bandas de frequência $f_1 \dots f_N$. Sob essa mesma área existe uma rede de rádios oportunistas que podem operar em qualquer uma dessas bandas de frequências, se não

causarem interferência prejudicial aos utilizadores celulares licenciados. Portanto, os rádios oportunistas têm a capacidade de “ouvir” outras bandas de frequência e explorar as oportunidades.

Ao considerar um rádio oportunista k localizado numa posição da célula, está inerente um canal de propagação entre o respectivo rádio oportunista k e o utilizador primário n , no qual as perdas são dadas por

$$L_o(k,n) = \frac{10^{\frac{PL_o(k,n)}{10}} \times 10^{\frac{SH_o(k,n)}{10}}}{10^{\frac{FF}{10}}}, \quad (3-12)$$

onde $PL_o(k,n)$ e $SH_o(k,n)$ correspondem respectivamente às perdas de propagação e ao desvanecimento lento, em dB, entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n . Por sua vez, FF corresponde ao desvanecimento rápido em dB.

A potência emitida pelo rádio oportunista k , $P_o(k)$, vai contribuir com um nível de interferência no utilizador primário n de

$$I_o(k,n) = \frac{P_o(k) \times G_{RO}(k) \times G_{UP}(n)}{L_o(k,n) \times L_{UP}(n)}, \quad (3-13)$$

onde G_{RO} representa o ganho da antena do rádio oportunista k .

Assim sendo, o nível de potência de interferência no utilizador primário n , incluindo a contribuição dos M rádios oportunistas presentes na área de cobertura da célula, é definido por

$$I_{RO}(n) = \alpha_c \times I_{intra}(n) + I_{inter}(n) + NF(n) \times N_0 \times W + \sum_{k=1}^M I_o(k,n), \quad (3-14)$$

o que quer dizer que um rádio oportunista k só pode transmitir se

$$\frac{P(n) \times G(n)}{I_{RO}(n)} > \gamma(n). \quad (3-15)$$

Substituindo o ganho de processamento da ligação entre a estação base e o utilizador primário n , $G(n)$, obtém-se

$$\frac{P(n) \times G_{EB} \times G_{UP}(n)}{I_{RO}(n) \times L_{UP}(n) \times L(n)} > \gamma(n). \quad (3-16)$$

Ao considerar apenas a célula central, os códigos de espalhamento perfeitamente ortogonais ($\alpha_c=0$) e um único rádio oportunista activo na área de cobertura da célula ($M=1$),

a $I_{RO}(n)$ reduz-se à interferência causada pelo rádio oportunista, pelo que pode isolar-se a contribuição do rádio oportunista,

$$\frac{P(n) \times G_{EB} \times G_{UP}(n)}{\gamma(n) \times L_{UP}(n) \times L(n)} > I_{RO}(n). \quad (3-17)$$

As regiões proibidas para a transmissão rádio oportunista são então, o conjunto de pontos tal que

$$[I_{RO}(n) > P(n) + G_{EB} + G_{UP}(n) - \gamma(n) - L_{UP}(n) - L(n)]_{dB}. \quad (3-18)$$

Refira-se que os algoritmos para adquirir a informação acerca das regiões proibidas não são objecto de estudo neste trabalho, ou seja, assume-se que essa informação é providenciada ao rádio oportunista.

3.2.1 Cálculo das Perdas de Canal L_o

Antes de mais, importa referir que a potência de emissão e o ganho da antena dos rádios oportunistas mantêm-se constantes durante toda a simulação. Refira-se ainda que o ganho da antena e as perdas dos utilizadores primários são definidos como $G_{UP}(1...K)=G_{UP}=\text{constante}$ e $L_{UP}(1...K)=L_{UP}=\text{constante}$, respectivamente.

Segundo a expressão (3-13), a interferência causada pelo rádio oportunista k no utilizador primário n depende de um conjunto de parâmetros, no entanto, apenas um é desconhecido e variável ao longo da simulação, as perdas do canal $L_o(k,n)$.

A Figura 3-5 apresenta os canais de propagação entre os vários dispositivos activos no sistema.

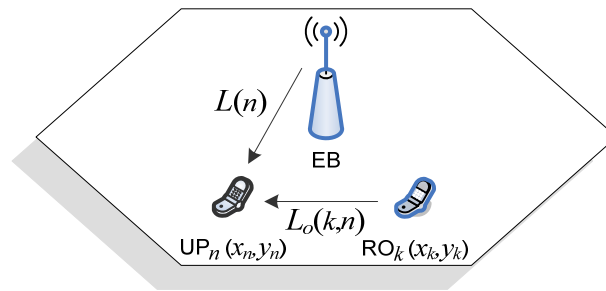


Figura 3-5 Canais de propagação entre os vários dispositivos activos no sistema

As perdas do canal entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n , são dadas pelas perdas de propagação $PL_o(k,n)$, pelo desvanecimento lento $SH_o(k,n)$ e pelo desvanecimento rápido FF , como define a expressão (3-12).

Estas contribuições são abordadas separadamente nas secções seguintes.

Perdas de Propagação

As perdas de propagação são geradas com base no modelo *COST-Walfisch-Ikegami*, descrito na secção §3.1.4.2. Logo, as perdas de propagação $PL_o(k,n)$ em função da distância d entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n , são dadas pela expressão (3-2). Desta forma, o cálculo das perdas de propagação $PL_o(k,n)$ passa simplesmente por recorrer ao teorema de Pitágoras e determinar a distância d entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n ,

$$d = \sqrt{(x_n - x_k)^2 + (y_n - y_k)^2} . \quad (3-19)$$

Desvanecimento Lento

Tal como antedito na secção §3.1.4.2, o desvanecimento lento bidimensional, entre a estação base e o utilizador primário n , é gerado no início de cada simulação (instante t_0), com base na expressão (3-3). A título de exemplo, para o instante de tempo t_1 , o desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário n , $SH(n)$, é calculado/actualizado recorrendo ao valor de desvanecimento lento gerado no instante t_0 , $SH_{old}(n)$, como apresenta a Figura 3-6.

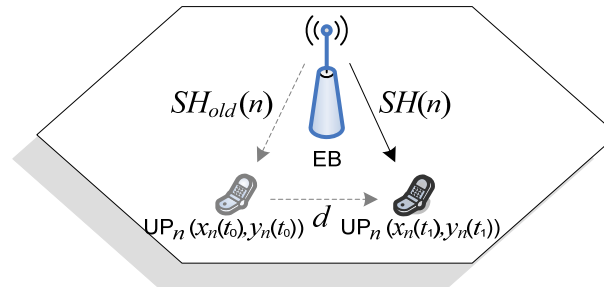


Figura 3-6 Cálculo/actualização do desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário n

A plataforma de simulação calcula a distância percorrida pelo utilizador primário n durante o intervalo de tempo de transmissão T_{ti} , i.e. a distância d entre a posição do UP_n no intervalo t_0 e a posição do UP_n no intervalo t_1 .

Seguidamente, por meio da distância d e da distância de decorrelação espacial do desvanecimento lento D , o simulador de sistema determina a correlação espacial do desvanecimento lento $R(d)$, entre a posição $UP_n(x_n(t_0), y_n(t_0))$ e $UP_n(x_n(t_1), y_n(t_1))$ da célula, dada pela expressão (3-4). Finalmente o desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário n , $SH(n)$, para o instante de tempo t_1 , é obtido através da expressão (3-5).

Com base no processo de cálculo do desvanecimento lento entre a estação base e o utilizador primário n , surge a abordagem seguidamente descrita para o cálculo do desvanecimento lento

entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n , no instante t_q ($q>0$).

Por um lado, considera-se que a posição do utilizador primário n , no instante de tempo t_q , corresponde à posição do rádio oportunista k , como ilustra a Figura 3-7. Por outro lado, considera-se que a posição do utilizador primário n , no instante de tempo t_{q-1} , corresponde à posição da estação base, $EB(0,0)$.

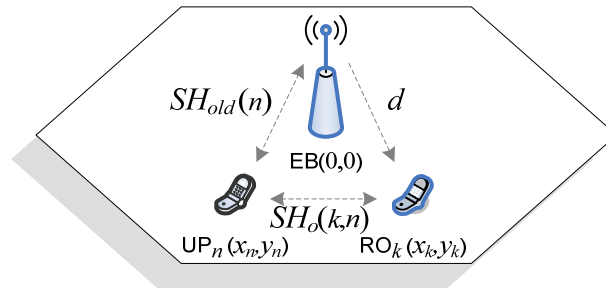


Figura 3-7 Abordagem para o cálculo do desvanecimento lento entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n

Assim, é necessário calcular a distância d entre a estação base e o rádio oportunista k bem como a correlação espacial do desvanecimento lento, $R(d)$, entre esses dois pontos. Uma vez conhecida a correlação espacial do desvanecimento lento entre a posição da estação base e a posição do rádio oportunista k , e sabendo o valor do desvanecimento lento na posição da estação base $SH_{old}(n)$, determina-se o desvanecimento lento entre o rádio oportunista k e o utilizador primário n , $SH_o(k,n)$.

Desvanecimento Rápido

Tal como referido na secção §3.1.4.2, o desvanecimento rápido é gerado usando o modelo Jakes para a geração das componentes independentes de Rayleigh [63]. O canal multipercurso baseia-se no modelo ITU veicular A. De salientar que a plataforma de sistema selecciona a velocidade e a frequência de portadora de acordo com o ambiente escolhido para a simulação. Estes parâmetros são utilizados para definir as estatísticas do desvanecimento.

3.2.2 Modos de Funcionamento Rádio Oportunista Implementados

No sentido de partilhar o espectro na frequência/espço/tempo entre um rádio oportunista e K utilizadores primários, algumas modificações/extensões específicas foram efectuadas na plataforma de sistema.

Antes mesmo de abordar essas alterações, apresentam-se os dois modos de funcionamento rádio oportunista implementados na plataforma de sistema, modo estático e modo dinâmico. Em ambos os modos propostos o gerador de eventos inclui um único rádio oportunista no sistema, $M=k=1$, e

distribui K utilizadores primários por cada uma das N frequências disponíveis. Segundo a Figura 2-10, existem 12 bandas de 5 MHz disponíveis no UMTS FDD DL, portanto, considera-se esse valor como o número máximo de frequências disponíveis, N_{max} .

3.2.2.1 Modo Estático (Mapas de Interferência)

No modo estático, a área de cobertura da célula é considerada como sendo uma matriz $m \times l$, como representa a Figura 3-8. Introduce-se no sistema um “rádio oportunista virtual”, numa determinada frequência f_i e instante de tempo t_q , o qual percorre todas as posições da célula/matriz, $RO_k(f_i, t_q, x_1 \dots x_l, y_1 \dots y_m)$.

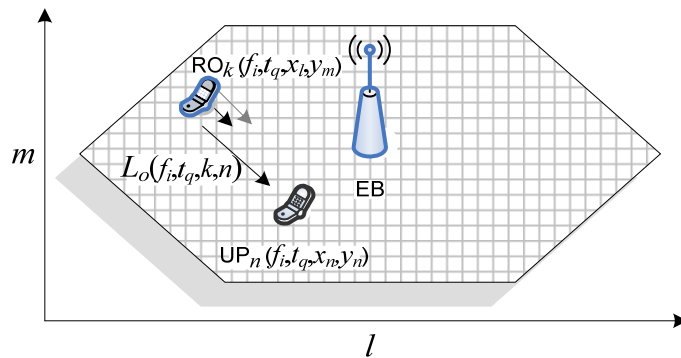


Figura 3-8 Modo estático

Para cada uma dessas posições calculam-se as perdas do canal entre o RO_1 e o UP_n , $L_o(f_i, t_q, 1, n)$, as quais contemplam apenas o $PL_o(f_i, t_q, 1, n)$ e o $SH_o(f_i, t_q, 1, n)$, ou seja, neste modo de funcionamento o FF não é considerado. Posteriormente, a relação sinal interferência no UP_n é calculada com base no limiar da relação sinal interferência, no ganho da antena e na potência emitida pelo rádio oportunista, obtidos a partir do ficheiro de configuração da simulação.

Caso a condição $SIR(n) > \gamma(n)$ se verifique, a posição do rádio oportunista é assinalada como permitida para transmissão. Caso contrário, a posição é assinalada como proibida para transmissão, i.e. o nível de potência da interferência causada pelo rádio oportunista no UP_n está acima do limite permitido. Como resultado obtém-se o mapa de interferência proibida em torno do UP_n . Após repetir este processo para os restantes utilizadores activos na frequência f_i , $K-1$, os mapas de interferência dos utilizadores primários são sobrepostos, obtendo-se as regiões permitidas/proibidas de comunicação na área de cobertura da célula para o instante t_q e frequência f_i .

Seja $\Omega_A(f_i, t_q)$ o conjunto de pontos/posições onde numa determinada frequência f_i e instante de tempo t_q um rádio oportunista pode transmitir.

Então, considerando várias frequências $f_1 \dots f_N$, a região permitida é dada por

$$\Omega_A(f_1 \dots f_N, t_q) = \bigcup_{i=1}^N \Omega_A(f_i, t_q). \quad (3-20)$$

Em suma, para um determinado instante de tempo t_q , o simulador é invocado N vezes, onde N corresponde ao número de frequências disponíveis na área de cobertura da célula, e gera, para cada frequência, os mapas de interferência. Na realidade, o resultado da simulação é armazenado num ficheiro de dados. Os mapas de interferência são posteriormente obtidos através de uma ferramenta de representação gráfica.

3.2.2.2 Modo Dinâmico

Dado que o rádio oportunista e os utilizadores primários estão em movimento durante a simulação, o modo dinâmico aproxima-se bastante dum cenário real. Importa frisar que neste modo a decisão não tem como suporte os mapas de interferência (muito pesado a título computacional).

Neste modo considera-se uma comunicação com duração T_{cd} . Durante a comunicação o rádio oportunista e os utilizadores primários presentes na área de cobertura da célula K_{all} , percorrem um caminho $ro(1, T_{cd})$ e $r(f_1 \dots f_N, 1 \dots K, T_{cd})$, respectivamente. Estes caminhos, representados na Figura 3-9, são ditados pelo modelo de mobilidade implementado no simulador de sistema; o mesmo é aplicado quer para o rádio oportunista, quer para os utilizadores primários.

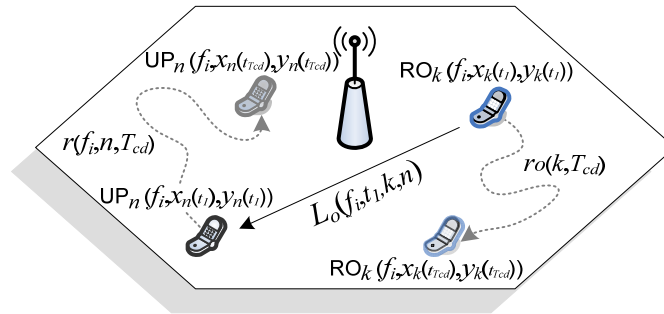


Figura 3-9 Modo dinâmico

Portanto, o rádio oportunista tenta iniciar uma comunicação na frequência f_i , no instante de tempo t_1 . Para isso, calculam-se as perdas do canal entre o RO e os K utilizadores primários activos na frequência f_i , $L_o(f_i, t_1, 1 \dots K)$ e determina-se a SIR associada a cada um deles. Caso a condição $SIR(n) \geq \gamma(n)$ seja válida para $n=1 \dots K$, o rádio oportunista transmite na frequência f_i , no instante de tempo t_1 . Caso contrário, o rádio oportunista tenta comunicar na frequência f_{i+1} , f_{i+2} , e assim sucessivamente. Este varrimento na frequência conclui-se quando o rádio oportunista encontrar uma oportunidade de comunicação ou já não existirem mais frequências disponíveis.

Obviamente se não existirem oportunidades nas frequências disponíveis, o rádio oportunista não transmite. Todo este processo repete-se durante o tempo da chamada $t_1 \dots t_{Tcd}$. Saliente-se ainda que os tempos de comutação *on* e *off* são definidos como sendo instantâneos.

Em jeito de síntese, as modificações/extensões efectuadas na plataforma de sistema resumem-se a,

- **Domínio da Interacção Humana (objecto – ficheiro de configuração)**
 - nova função que devolve a opção do modo de operação (estático ou dinâmico);
 - nova função que devolve o número de utilizadores primários presentes na área de cobertura da célula (K_{all});
 - nova função que devolve o número de ROs activos na área de cobertura da célula ($M=1$ =máximo permitido);
 - nova função que devolve a potência de emissão do RO (P_o);
 - nova função que devolve o ganho da antena do RO (G_{RO});
 - nova função que devolve o número de frequências disponíveis (N);
 - nova função que devolve o limiar da relação sinal interferência (γ);
- **Domínio do Problema (classe – modelo de canal e interferência)**
 - nova função que calcula as perdas de propagação (PL_o);
 - reuso da função de cálculo da distância entre dois pontos;
 - nova função que calcula o desvanecimento lento (SH_o);
 - reuso da função que gera o desvanecimento rápido (FF);
 - nova função que calcula a SIR nos utilizador primários, tendo em conta a interferência rádio oportunista;
- **Domínio do Problema (classe – modelo de mobilidade)**
 - reuso da função que gera a mobilidade dos terminais; aplicada ao rádio oportunista (modo dinâmico);
- **Domínio da Coordenação de Tarefas (objecto – gerador de eventos)**
 - nova função que gera o processo de entrada do rádio oportunista no sistema;
 - nova função que gera as frequências disponíveis;
 - nova função que distribui os utilizadores primários pelas frequências disponíveis;

- **Domínio da Coordenação de Tarefas (objecto – coordenador de tarefas)**
 - extensão da função “CoordenadorTarefas()” por forma a calcular, num determinado instante de tempo t_q , a SIR de cada utilizador primário; este processo é repetido assumindo como origem da interferência rádio oportunista, todas as posições da área da célula (modo estático);
 - extensão da função “CoordenadorTarefas()” por forma a calcular, em cada instante de tempo t_q , a SIR de cada utilizador primário, tendo em conta a interferência rádio oportunista (modo dinâmico);
- **Domínio dos Resultados (objecto – base de dados de resultados)**
 - nova função que armazena os resultados das simulações num ficheiro de dados.

3.3 Métricas para Avaliação das Oportunidades de Comunicação

Nesta secção descrevem-se as métricas usadas para processar as estatísticas obtidas nas simulações realizadas. As métricas definidas caracterizam essencialmente o cenário, de modo a que um sistema real possa ser projectado através da optimização das mesmas. Nestes termos, definiram-se métricas para determinar a probabilidade de comunicação, o tempo de comunicação, a duração da oportunidade, a duração da interferência, a probabilidade de transição entre estados/frequências e a duração média entre transições de frequência.

As métricas definidas para cada modo de funcionamento RO são apresentadas de seguida.

3.3.1 Modo Estático

No modo estático definiu-se uma métrica para analisar as oportunidades de comunicação rádio oportunista.

3.3.1.1 Probabilidade de Comunicação

A métrica probabilidade de comunicação P_c , traduz a probabilidade de um rádio oportunista, largado numa posição aleatória da célula, não perturbar a comunicação existente na rede primária. Esta métrica é obtida com base nos mapas de interferência. A união das regiões de comunicação permitidas, para o conjunto de frequências disponíveis, num dado instante t_q , $\Omega_A(f_1 \dots f_N, t_q)$, é dada pela união das regiões de comunicação permitidas de cada uma das frequências. Logo, a probabilidade de um rádio oportunista, localizado na posição x , obter permissão para iniciar comunicação é dada por

$$P_c = Pr(x \in \Omega_A(f_1 \dots f_N, t_q)). \quad (3-21)$$

Por outro lado, a probabilidade da comunicação rádio oportunista ser bloqueada por limitações da rede primária é definida por

$$P_b = \left\langle 1 - Pr\left(x \in \Omega_A(f_1 \cdots f_N, t_q)\right) \right\rangle_t, \quad (3-22)$$

onde $\langle \cdot \rangle_t$ representa uma operação de média temporal.

Assumindo ergodicidade, obtém-se

$$P_c = \overline{\Omega}_A / A_{cel}, \quad (3-23)$$

onde $\overline{\Omega}_A$ denota a área média das regiões permitidas e A_{cel} a área da célula.

3.3.2 Modo Dinâmico

Como já referido, as métricas definidas no modo dinâmico têm como suporte uma chamada rádio oportunista com duração T_{cd} .

3.3.2.1 Tempo de Comunicação

O tempo de comunicação T_c corresponde à soma dos intervalos de tempo de transmissão T_{ti} , durante a chamada, nos quais há comunicação por parte do rádio oportunista, ou seja

$$T_c = \sum_{t_q=1}^{N_{Ti}} T_{ti}(t_q), \text{ quando } P_o(t_q) \neq 0, \quad (3-24)$$

onde N_{Ti} corresponde ao número de T_{ti} durante a chamada (cada T_{ti} tem uma duração de 2 ms).

Pode também determinar-se o tempo de comunicação através de

$$T_c = T_{cd} - T_{off}, \quad (3-25)$$

onde T_{cd} corresponde ao tempo de duração da chamada em segundos e T_{off} à soma dos intervalos de tempo de transmissão, durante a chamada, nos quais não houve comunicação rádio oportunista

$$T_{off} = \sum_{t_q=1}^{N_{Ti}} T_{ti}(t_q), \text{ quando } P_o(t_q) = 0, \quad (3-26)$$

devido às limitações da rede primária.

3.3.2.2 Duração da Oportunidade e Interferência

A duração da oportunidade Δt_o , corresponde ao intervalo de tempo no qual a comunicação rádio oportunista não é interrompida, i.e. intervalo de tempo sem qualquer bloqueio por parte da rede

primária. Como ilustra a Figura 3-10, a métrica duração da oportunidade contempla eventuais saltos entre frequências disponíveis (para $N > 1$, evidentemente).

Segundo a secção §2.4.1, o rádio oportunista transmite desde que não interfira prejudicialmente com os utilizadores primários. Neste termos, e com o intuito de determinar o intervalo de tempo em que o rádio oportunista não é autorizado a comunicar, define-se a métrica duração da comunicação proibida Δt_p , representada na Figura 3-10.

Por outro lado, ao considerar que o rádio oportunista transmite em quaisquer condições, a métrica duração da comunicação proibida Δt_p não é mais do que a duração em que o rádio oportunista interfere de forma prejudicial com os utilizadores primários, ou seja, duração da interferência Δt_i ($\therefore \Delta t_p \equiv \Delta t_i$, ver Figura 3-10).

Embora sejam consideradas restrições ao nível da transmissão rádio oportunista, optou-se por usar a métrica duração da interferência.

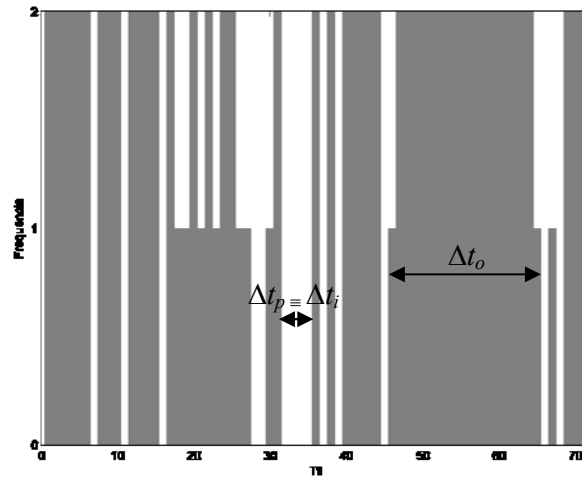


Figura 3-10 Intervalos de tempo de transmissão com e sem comunicação rádio oportunista ($N=2$)

Importa realçar que as durações Δt_o e Δt_i são determinadas com base em valores médios.

3.3.2.3 Probabilidade de Transição

A métrica probabilidade de transição define a probabilidade de um rádio oportunista comutar de frequência de operação/portadora, durante o tempo de duração da sua chamada. Se P_{ij} representa a probabilidade de transição entre o estado i e o estado j , então

$$P_{ij} = \frac{Nt_{ij}}{\sum_{j=0}^N Nt_{ij}}, \quad (3-27)$$

onde Nt_{ij} representa o número de transições entre o estado i e o estado j durante a chamada rádio oportunista. Importa salientar que o estado i e j representam os estados em que o rádio oportunista TDD comunica através da banda de frequência FDD f_i e f_j , respectivamente.

Esta métrica permite definir diagramas de transição e assumindo que o sistema pode ser descrito por uma cadeia de Markov, como representa a Figura 3-11, é possível caracterizar completamente o comportamento do sistema.

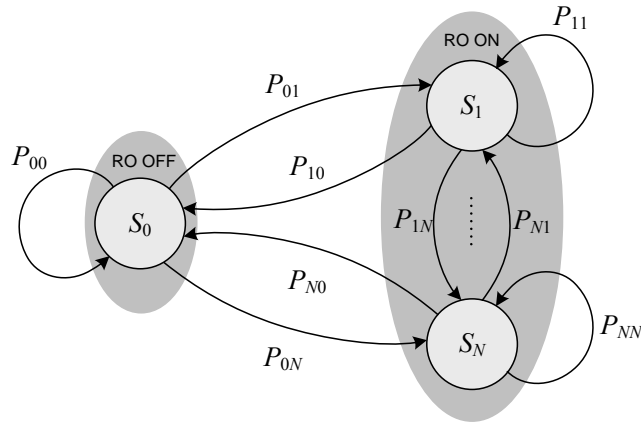


Figura 3-11 Cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista

Considerando N frequências para a comunicação rádio oportunista e assumindo que não existem recursos rádio disponíveis na rede UMTS TDD, obtêm-se $N+1$ estados,

- S_0 : não existem recursos rádio disponíveis nas redes FDD e o terminal rádio oportunista TDD está desligado;
- S_i : o rádio oportunista TDD comunica através da banda de frequência FDD f_i ;
- P_{ij} : probabilidade de transição da frequência f_i para a frequência f_j .

Com esta caracterização as estatísticas das oportunidades podem ser calculadas usando o diagrama de transição [64]. Seja $\pi_i \equiv$ a probabilidade do terminal estar no estado S_i , então

$$\vec{\pi} = \begin{pmatrix} \pi_0 \\ \vdots \\ \pi_N \end{pmatrix} = \vec{P} \vec{\pi}, \quad (3-28)$$

onde \vec{P} é a matriz probabilidade de transição, i.e. o elemento ij de \vec{P} é P_{ij} .

A probabilidade de comunicação definida em (3-21) pode ser obtida por

$$P_c = 1 - \pi_0 = \sum_{i=1}^N \pi_i. \quad (3-29)$$

A duração da oportunidade na frequência f_j , i.e. o tempo consecutivo em que f_j está disponível para comunicação, pode ser obtida através de

$$\Delta t_o(f_j) = T_{ii} \frac{P_{ii}}{(1 - P_{ii})^2}. \quad (3-30)$$

Considerando todas as frequências, a duração da oportunidade, que pode envolver saltos entre diferentes frequências disponíveis, é dada por

$$\Delta t_o = T_{ii} \frac{1 - \sum_{i=1}^N P_{i0}}{\left(\sum_{i=1}^N P_{i0} \right)^2}. \quad (3-31)$$

Outras métricas/estatísticas de interesse são o tempo médio em que a frequência de portadora do rádio oportunista permanece em S_0 (dado não existirem oportunidades), e o tempo médio das oportunidades. No entanto, mesmo quando há oportunidades o rádio oportunista pode eventualmente necessitar de comutar entre as frequências disponíveis; assim sendo, define-se a métrica duração média entre transições de frequência. Por forma a determinar estas estatísticas considera-se a cadeia apresentada na Figura 3-12, no qual a variável D_t representa uma iteração T_{ii} , S_{in} o estado inicial e S_f o estado final.

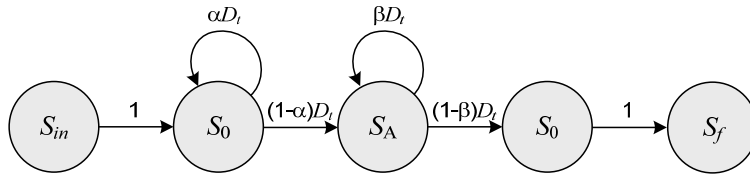


Figura 3-12 Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista

Para determinar o tempo médio em que a frequência de portadora do rádio oportunista permanece em cada estado, desde que sai de S_0 até que regresse a S_0 e similarmente ao procedimento utilizado nos códigos convolucionais para caracterizar o perfil da distância, considera-se o estado inicial e o estado final como sendo o estado S_0 . O uso do modelo da Figura 3-12, onde $S_A = S_1 \cup S_2$ ($N=2$), permite calcular o número médio de transições desde que a frequência de portadora do rádio oportunista sai do estado S_0 até que regresse ao estado S_0 , dado por

$$N_{00} = 1 + \underbrace{\frac{\alpha}{1-\alpha}}_{\text{n}^\circ \text{ transições em } S_0} + \underbrace{\frac{\beta}{1-\beta}}_{\text{n}^\circ \text{ transições em } S_A}, \quad (3-32)$$

onde α e β representam a probabilidade de transição de S_0 para S_0 e S_A para S_A , respectivamente. A derivação da expressão (3-32) apresenta-se em apêndice na secção §A.1.

Assim, o tempo médio em que a frequência de portadora do RO permanece em S_0 é

$$T(S_0) = \frac{\alpha}{1-\alpha} T_{ii}, \quad (3-33)$$

e o tempo médio passado em S_A (i.e. com oportunidades para comunicar) é dado por

$$T(S_A) = \frac{\beta}{1-\beta} T_{ii}. \quad (3-34)$$

As derivações das expressões (3-33) e (3-34) apresentam-se em apêndice na secção §A.2.

Decompondo o estado S_A em $S_1 \cup S_2$, como ilustra a Figura 3-13,

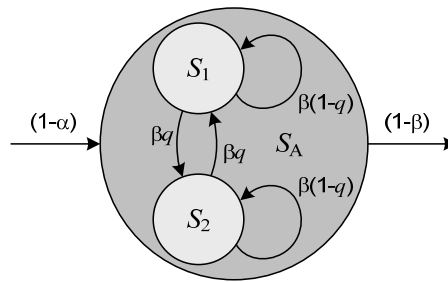


Figura 3-13 Estado S_A da cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista ($N=2$)

é possível demonstrar que durante o tempo $T(S_A)$, o número de transições entre as frequências f_1 e f_2 , é

$$Nt_{\text{int}} = \frac{\beta q}{1-\beta}. \quad (3-35)$$

Portanto, a duração média entre transições de frequência é dada por

$$\Delta t_{S_1, S_2} = \frac{T(S_A)}{Nt_{\text{int}}} = \frac{\beta T_{ii}}{1-\beta} \frac{1-\beta}{\beta q} = \frac{T_{ii}}{q}. \quad (3-36)$$

A derivação da expressão (3-35) apresenta-se em apêndice na secção §A.3.

As métricas aqui definidas caracterizam essencialmente o ambiente rádio, designadamente as oportunidades de comunicação rádio oportunista em redes UMTS. As oportunidades de comunicação obtidas através da simulação do sistema são apresentadas no capítulo que se segue.

4

Avaliação das Oportunidades de Comunicação

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados que visam avaliar a viabilidade de um sistema rádio oportunista operar sob uma rede celular UMTS. Esses resultados foram obtidos através de simulações numéricas realizadas em computadores, sendo para tal empregue a ferramenta de simulação, apresentada no capítulo 3, que reproduz o nível de sistema de uma rede celular UMTS. Este capítulo inicia com uma descrição da configuração do simulador de sistema, usado para avaliar a coexistência entre utilizadores licenciados e rádios oportunistas. Seguidamente, apresenta os resultados considerando o modo estático e dinâmico de funcionamento rádio oportunista.

Saliente-se que os resultados apresentados neste capítulo denotam o pior cenário possível, uma vez que é considerado actividade primária em todas as frequências disponíveis e que a potência primária recebida, em cada uma dessas frequências, é igual à sensibilidade dos receptores, ou seja, maior susceptibilidade à interferência.

4.1 Configuração do Simulador de Sistema

As métricas apresentadas no capítulo anterior foram avaliadas para diversos cenários possíveis. Para tal, realizaram-se múltiplas execuções da plataforma de sistema, encontrando-se apresentados na Tabela 4-1 os parâmetros mais importantes na configuração da mesma.

Alguns dos parâmetros presentes na Tabela 4-1 têm associados diferentes valores, como é o caso dos parâmetros *Potência Emitida pelo Rádio Oportunista* e *Número de Frequências Disponíveis*, uma vez que foram realizadas diferentes simulações para avaliar as oportunidades de comunicação em função da potência de emissão rádio oportunista e dos recursos rádio disponíveis. Basicamente, o modelo utilizado para o cálculo das perdas de canal é gerado em três etapas. A primeira etapa é responsável pela geração das perdas de propagação.

As perdas de propagação, incluem uma componente expoente, PL_{expoente} , e uma componente constante, $PL_{\text{constante}}$, tal que

$$PL(n) = PL_{\text{constante}} + PL_{\text{expoente}} \log_{10}(d). \quad (4-1)$$

A segunda etapa gera os parâmetros associados ao desvanecimento lento e realiza-se antes de executar o simulador de sistema propriamente dito. Nesta etapa são produzidos dados referentes à descrição espacial da propagação existente no canal, para uma determinada realização, considerando os referidos parâmetros de variação lenta, sendo os resultados posteriormente empregues na terceira etapa, no sentido de gerar a respectiva resposta do canal em termos de desvanecimento rápido. Os parâmetros temporais empregues na terceira etapa provêm do modelo de canal ITU veicular A, especificado pela recomendação ITU-R M.1225 (*International Telecommunication Union-Radiocommunication*) [65]. O cenário 3GPP *Urban Macro* foi considerado em termos de parâmetros espaciais.

Nas simulações realizadas, considera-se uma única célula, omnidireccional, com raio de 577 metros; considera-se que o espalhamento de dados é efectuado com sequências de comprimento 16 e que cada frequência disponível, num máximo de 12^3 , contém 5 utilizadores primários activos. Note-se que, num sistema CDMA com 16 códigos, 5 utilizadores correspondem a uma carga de aproximadamente $5/16 \approx 30\%$. Considera-se ainda que o controlo de potência, no sentido descendente da ligação, é perfeito, e que o débito de informação dos utilizadores primários é 12.2 kbps (R_b), o equivalente a uma chamada de voz.

Se W denotar a largura de banda do sinal, E_b a energia de bit e N_0 a densidade espectral de potência do ruído, a relação sinal interferência requerida no utilizador primário é dada por

$$SIR = \frac{R_b}{W} \frac{E_b}{N_0}. \quad (4-2)$$

Segundo [66] a eficiência de potência alvo, E_b/N_0 , para o serviço de voz é de 9 dB. Substituindo, obtém-se

$$SIR_{\text{dB}} = \left(\frac{R}{W} \right)_{\text{dB}} + \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{dB}} = 10 \log \left(\frac{12.2}{3840} \right) + 9 \approx -16 \text{dB}. \quad (4-3)$$

Refira-se que a largura de banda utilizada no cálculo da SIR, corresponde à largura de banda útil do sinal UMTS e não à largura de banda nominal do mesmo. Como ilustra a Figura 4-1, a largura de banda ocupada pelo sinal é de 5 MHz, no entanto, 1.16 MHz são destinados às bandas de guarda.

³ Banda de Operação I (2110-2170 MHz, FDD DL) [67].

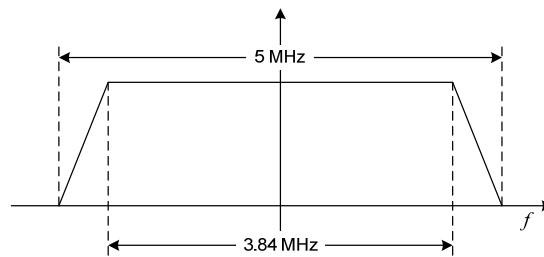


Figura 4-1 Banda associada à portadora unidireccional no UMTS FDD

Sob a área de cobertura da célula assume-se um único terminal rádio oportunista com potência de emissão compreendida entre 10 e -44 dBm (classe de potência 4 do UMTS TDD). A chamada rádio oportunista tem uma duração de 90 segundos, equivalente a 45000 intervalos de tempo de transmissão (T_{ti}).

Os restantes, e não menos importantes, parâmetros de configuração apresentam-se na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Resumo dos parâmetros empregues nas simulações

Parâmetro	Valor
Sistema UMTS FDD DL	
Intervalo de Tempo de Transmissão (T_{ti})	2 ms
Tipo de Célula	Omnidireccional
Raio da Célula	577 m [66]
Gestor de Recursos Rádio	
Largura de Banda (W)	5 MHz [68]
Número Máximo de Frequências Disponíveis (N_{max})	12 (Banda I) [67][69]
Débito de Informação (R_b)	12.2 kbps (serviço de voz) [66]
E_b/N_0 Alvo (12.2 kbps)	9 dB [66]
SIR Alvo (γ)	-16 dB
Factor de Espalhamento	16
Densidade Espectral de Ruído (N_0)	-174 dBm/Hz
Incremento de Potência	Controlo Perfeito de Potência

Modelo de Canal	Urbano
Frequência da Portadora (f_c)	2 GHz ⁴
PL constante	143.4 dB [61]
PL expoente	38 [61]
Desvio padrão do Desvanecimento Lento (σ)	8 dB [60]
Distância de Descorrelação Espacial (D)	50 m [60]
Modelo de Canal	ITU Veicular A [68]
Velocidade dos Terminais Móveis	30 km/h [68]
Estação Base (EB)	
Potência Máxima Emitida pela EB ($P_{[max]}$)	13 dBW [67]
Ganho da Antena da EB (G_{EB})	11 dBi
Número de Células Vizinhas (N_{EB})	0
Perdas na EB (L_{EB})	2 dB
Utilizador Primário (UP)	
Número de UPs activos em cada frequência disponível (K)	5
Sensibilidade/Potência Recebida no UP (P_r)	-117 dBm [68]
Ganho da Antena do UP (G_{UP})	0 dBi
Figura de Ruído do UP (NF)	9 dB
Perdas no UP (L_{UP})	0 dB
Factor de Ortogonalidade (α_c)	0
Rádio Oportunista (RO) TDD	
Número de ROs activos na área de cobertura da célula (M)	1

⁴ Considerou-se a f_c fixa e igual a 2 GHz. A f_c não varia entre 2.11 e 2.17 GHz devido à limitação do modelo de propagação COST-Walfisch-Ikegami (válido para [0.8;2] GHz).

Potência Máxima/Mínima Emitida pelo RO ($P_o [max/min]$)	10/-44 dBm [70]
Ganho da Antena do RO (G_{RO})	0 dBi
Duração da Chamada RO (T_{cd})	90 s

Segundo os dados da Tabela 4-1, todas as frequências/sistemas disponíveis, N , têm a mesma carga de utilizadores primários. Cada um destes utilizadores primários recebe a mesma potência de sinal, oriunda da estação base, e possui o mesmo requisito de relação sinal interferência. Assim, garante-se a uniformidade de oportunidades nas diferentes frequências disponíveis. Nestas condições a avaliação das métricas propostas em função do número de frequências disponíveis é realizada de forma coerente.

Grande parte dos gráficos apresentados na secção §4.2, representam para diferentes potências de emissão do rádio oportunista a evolução da probabilidade/tempo/duração em função do número de frequências disponíveis numa determinada área geográfica. Os valores apresentados correspondem ao valor médio dos resultados obtidos para um conjunto de simulações efectuadas.

4.2 Resultados

Seguidamente são apresentados os resultados considerando o modo estático e dinâmico de funcionamento rádio oportunista.

Como já referido, os resultados foram obtidos através de simulações do sistema assumindo uma única célula e códigos de espalhamento ortogonais entre si ($\alpha_c=0$). Quer isto dizer que, ao não considerar células vizinhas, não há interferência intercelular e ao considerar códigos de espalhamento perfeitamente ortogonais, a interferência intracelular é nula.

4.2.1 Modo Estático

No modo estático assume-se que os mapas de interferência são gerados e disponibilizados ao rádio oportunista. A informação dos mapas de interferência é classificada como perfeita e tal como referido na secção §3.2, os algoritmos necessários para a aquisição dessa informação não são abordados neste trabalho.

No sentido de determinar as oportunidades de comunicação num sistema de partilha de espectro, utiliza-se a métrica probabilidade de comunicação definida na secção §3.3.1.1. A probabilidade de comunicação P_c , define a probabilidade de um rádio oportunista, largado numa posição aleatória da célula, não perturbar a comunicação existente na rede primária num determinado instante t_q .

Como exemplo dos resultados a Figura 4-2 e Figura 4-3 representam as regiões permitidas/proibidas em torno de cada utilizador primário para a frequência f_1 e f_2 , respectivamente, considerando uma potência de emissão do rádio oportunista de 0 dBm. Os espaços em branco representam as regiões da célula onde, no instante t_q , o rádio oportunista pode transmitir. Por sua vez as posições proibidas para a transmissão rádio oportunista estão representadas a escuro.

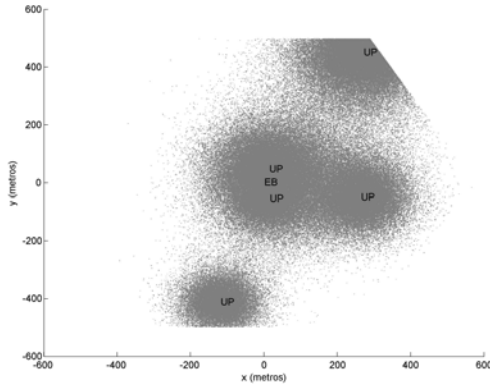


Figura 4-2 Mapas de interferência para a frequência f_1 , e $P_o=0$ dBm

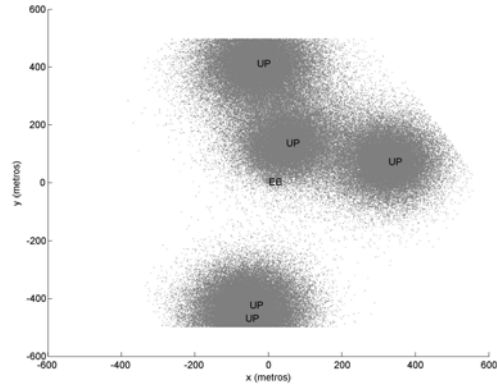


Figura 4-3 Mapas de interferência para a frequência f_2 , e $P_o=0$ dBm

A Figura 4-4 apresenta as regiões permitidas/proibidas obtidas pela sobreposição dos mapas de interferência das frequências f_1 e f_2 . A Figura 4-5 ilustra o resultado dos mapas de interferência considerando 3 frequências disponíveis. Comparando a Figura 4-3, Figura 4-4 e Figura 4-5, é transparente que o número de oportunidades de comunicação cresce rapidamente com o número de frequências licenciadas disponíveis.

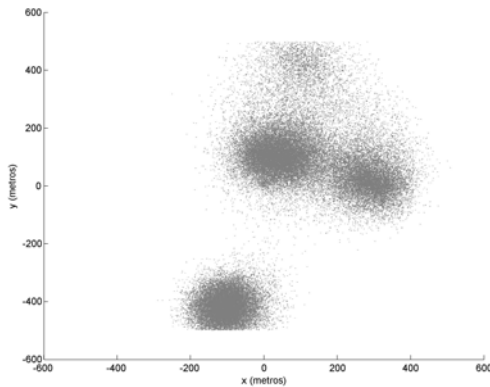


Figura 4-4 Mapas de interferência para $N=2$ (f_1+f_2), e $P_o=0$ dBm

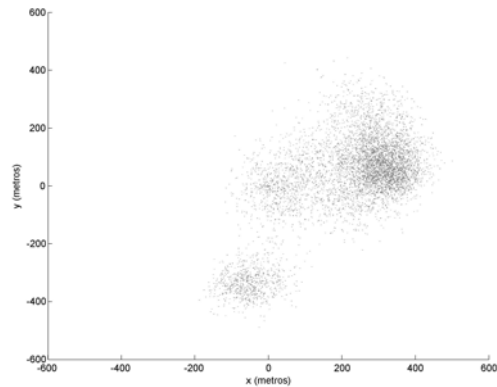


Figura 4-5 Mapas de interferência para $N=3$ ($f_1+f_2+f_3$), e $P_o=0$ dBm

Importa realçar que, para várias frequências $f_1...f_N$ e instante t_q , a região onde um rádio oportunista pode transmitir é dada pela união das regiões permitidas para cada uma das frequências disponíveis, expressão (3-20). Na Figura 4-6 e Figura 4-7 apresentam-se os mapas de interferência para 1 e 3 frequências disponíveis, respectivamente, considerando uma $P_o = 5$ dBm.

Pela observação da Figura 4-6 verifica-se que os mapas de interferência em torno dos utilizadores primários têm um raio de sensivelmente 150 metros. A semelhança entre os raios dos diferentes mapas de interferência é explicada pelo facto da potência recebida e do requisito da SIR serem os mesmos para todos os utilizadores primários.

Comparando a Figura 4-6 e Figura 4-7 é visível que as regiões escuras diminuem consideravelmente, quando consideradas mais duas frequências disponíveis.

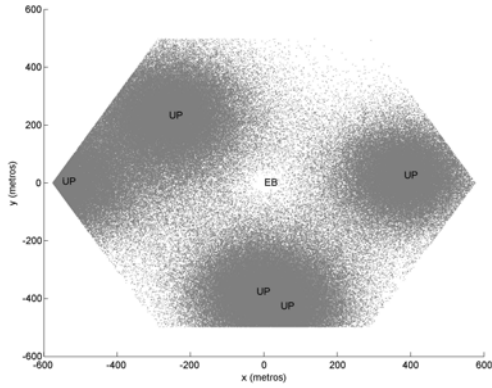


Figura 4-6 Mapas de interferência para $N=1$, e $P_o=5$ dBm

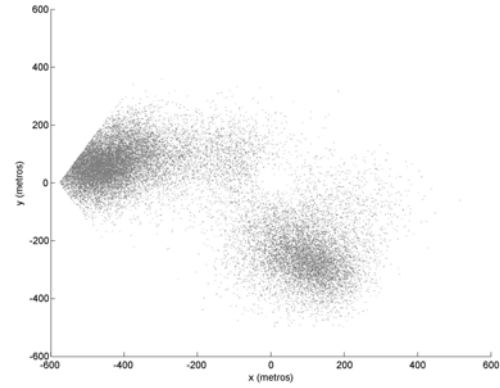


Figura 4-7 Mapas de interferência para $N=3$, e $P_o=5$ dBm

Na Figura 4-8 e Figura 4-9 encontram-se igualmente representadas as regiões permitidas/proibidas para 1 e 3 frequências disponíveis, respectivamente. Segundo as mesmas, constata-se que um rádio oportunista que transmita uma potência de 10 dBm, possui poucas oportunidades de comunicar com êxito mesmo considerando 3 frequências licenciadas disponíveis.

De salientar que para $N=1$, o número de utilizadores primários activos na área da célula é igual ao número de utilizadores activos na frequência f_1 , $K_{all}=K=5$. Por outro lado, para $N=3$, $K_{all}=15$.

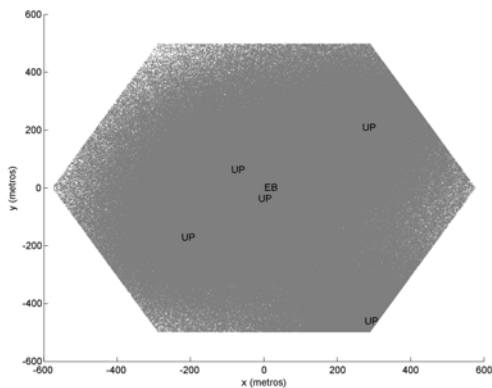


Figura 4-8 Mapas de interferência para $N=1$, e $P_o=10$ dBm

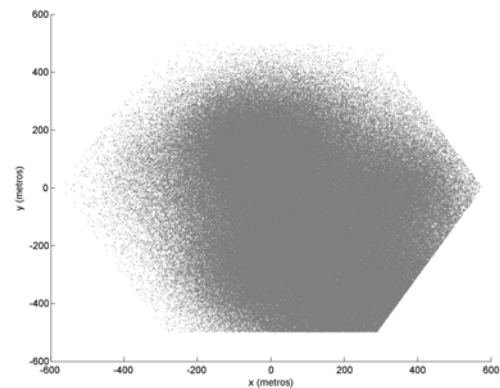


Figura 4-9 Mapas de interferência para $N=3$, e $P_o=10$ dBm

Efectuou-se um conjunto de simulações no sentido de avaliar a probabilidade de comunicação rádio oportunista em função do número de frequências disponíveis, ver Figura 4-10.

Pode observar-se na Figura 4-10 o efeito de aumentar o número de frequências disponíveis na probabilidade de comunicação, para diferentes potências de emissão rádio oportunista. Verifica-se que a probabilidade de comunicação aumenta e atinge sensivelmente 98% com 6 frequências disponíveis, para uma potência de emissão rádio oportunista de 0 dBm. Para alcançar uma probabilidade de comunicação acima dos 90%, considerando uma P_o de 0 dBm, devem estar disponíveis pelo menos 4 frequências. Por outro lado, para uma P_o de 5 dBm, a mesma probabilidade é apenas alcançada com 6 frequências disponíveis.

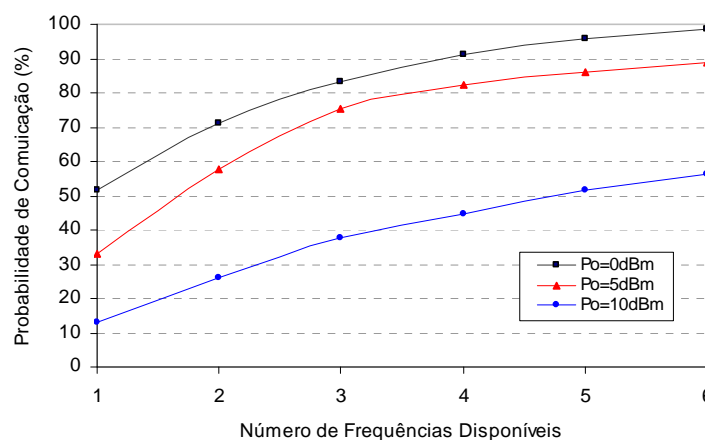


Figura 4-10 Probabilidade de comunicação em função do número de frequências disponíveis, para $P_o = 0, 5$ e 10 dBm

Ainda segundo a Figura 4-10, a probabilidade de comunicação de um rádio oportunista, que transmita à máxima potência, não chega aos 60%, mesmo considerando 6 frequências disponíveis. Os resultados da Figura 4-10 evidenciam, como esperado, que quanto menor a potência de emissão do rádio oportunista, maior a probabilidade do mesmo comunicar.

4.2.2 Modo Dinâmico

Antes de mais, importa reforçar que as métricas analisadas nesta secção têm como suporte uma chamada rádio oportunista com duração T_{cd} . Realizou-se um conjunto de simulações considerando, um cenário urbano, uma velocidade de 30 km/h para os terminais móveis e uma duração da chamada igual a 90 segundos.

Apresenta-se na Figura 4-11 o caminho típico de um terminal móvel na área de célula, durante o tempo de duração da chamada.

Baseado nos caminhos dos terminais móveis, na potência de emissão do rádio oportunista e no número de frequências disponíveis, calculou-se o tempo de comunicação, a duração da

oportunidade, a duração da interferência, a probabilidade de transição entre frequências e a duração média entre transições de frequência. Os resultados inerentes a estas métricas apresentam-se nas secções seguintes.

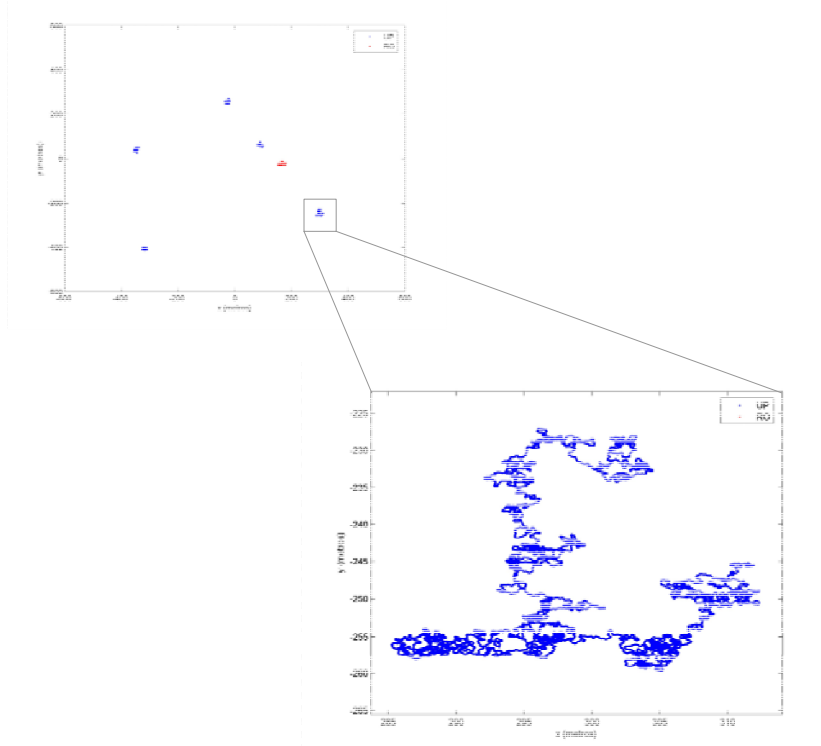


Figura 4-11 Caminho típico de um terminal móvel na área da célula durante o tempo de simulação (duração da chamada RO)

4.2.2.1 Tempo de Comunicação

Por forma a determinar os intervalos de tempo de transmissão T_{ti} , durante a chamada, nos quais há comunicação por parte do rádio oportunista, utiliza-se a métrica tempo de comunicação, T_c . Os resultados obtidos após um conjunto de simulações apresentam-se nas figuras seguintes.

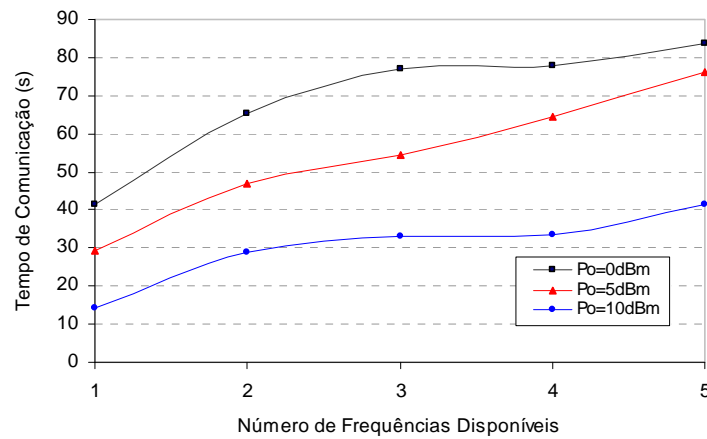


Figura 4-12 Tempo de comunicação em função do número de frequências disponíveis, para $P_o = 0, 5$ e 10 dBm

A Figura 4-12 apresenta a influência das frequências licenciadas disponíveis numa chamada rádio oportunista com duração de 90 segundos. Verifica-se, tal como se antevia, que o tempo de comunicação aumenta com o número de frequências disponíveis. Segundo a mesma figura, para o rádio oportunista alcançar um tempo de comunicação superior a 70 segundos, para uma P_o de 0 dBm, devem estar disponíveis pelo menos 3 frequências. Caso o rádio oportunista aumente a sua potência de emissão para 5 dBm, o mesmo tempo de comunicação é apenas atingido com 5 frequências disponíveis. Por outro lado, se o rádio oportunista transmitir com a máxima potência, o seu tempo de comunicação não vai além dos 40 segundos, isto considerando 5 frequências disponíveis.

Ao efectuar a seguinte operação

$$T_c = T_{cd} P_c, \quad (4-4)$$

tendo por base os resultados da P_c , apresentados na Figura 4-10, constata-se que há uma ligeira discrepância entre os valores do tempo de comunicação obtidos através da expressão (4-4), quando comparados com aqueles apresentados na Figura 4-12. Esta diferença é explicada pelo facto da probabilidade de comunicação (modo estático) ter sido calculada com base em todas as posições da célula, ao contrário daquilo que é feito no modo dinâmico, onde o cálculo apenas engloba o percurso do rádio oportunista. Posto isto, seria necessário realizar um conjunto infinito de simulações para que os tempos de comunicação obtidos pelos dois modos de funcionamento convergissem.

A Figura 4-13 apresenta o impacto da potência de emissão do rádio oportunista na sua própria chamada, considerando 1, 2 e 3 frequências disponíveis. Os resultados evidenciam que para atingir um tempo de comunicação de 90 segundos para $N=1$, o rádio oportunista deve transmitir no máximo -35 dBm. Para $N=2$ e $N=3$, o mesmo tempo de comunicação é alcançado se a potência de emissão do rádio oportunista for inferior a -30 e -15 dBm, respectivamente.

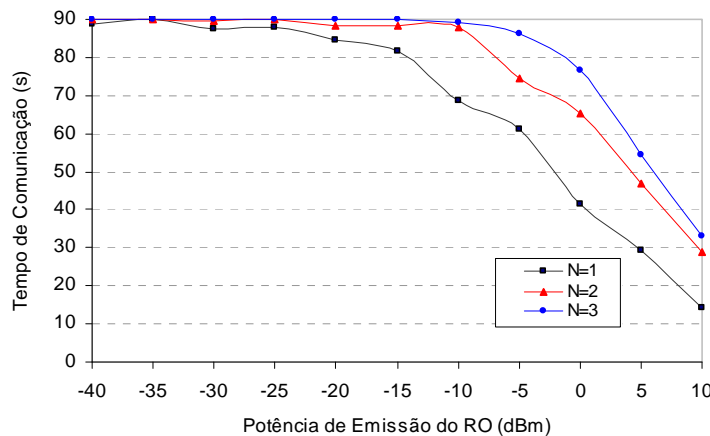


Figura 4-13 Tempo de comunicação em função da potência de emissão do RO, para $N = 1, 2$ e 3

Segundo os resultados obtidos para $N=3$ e $P_o=-20$ dBm, o tempo de comunicação é igual a 89.98 segundos; e não 90 como dá a entender o ponto da curva da Figura 4-13. Esta pequena diferença entre o T_c e o T_{cd} , mais precisamente 0.02s, representa 10 T_{ti} , i.e. durante 10 intervalos de tempo de transmissão o rádio oportunista não comunica. Este dado pode ser interpretado da seguinte forma: ex., o rádio oportunista comunica durante 8 segundos consecutivos e é interrompido; e assim sucessivamente até ao fim da chamada rádio oportunista. Posto isto, deduz-se facilmente que a métrica tempo de comunicação não traduz o tempo de comunicação sem interrupção; motivo pelo qual é definida, na secção §3.3.2.2, a métrica duração da oportunidade que corresponde ao intervalo de tempo no qual a comunicação rádio oportunista não é interrompida.

4.2.2.2 Duração da Oportunidade

Efectuaram-se três conjuntos de simulações, para 1, 2 e 3 frequências disponíveis, de modo a avaliar a duração das oportunidades de comunicação rádio oportunista. Para cada um dos conjuntos de simulações consideraram-se várias potências de emissão do rádio oportunista. Como potência inicial assumiu-se -40 dBm. De seguida incrementou-se a P_o de 2 dBm até observar a concentração das oportunidades entre 0 e 1 segundo.

Duração da Oportunidade considerando $N=1$

Nesta secção analisa-se a duração da oportunidade para uma única frequência disponível.

Nas Figura 4-14 e Figura 4-15 apresentam-se os resultados da probabilidade em função da duração da oportunidade, para uma potência de emissão do rádio oportunista de -40 e -38 dBm, respectivamente. Pela observação da Figura 4-14 constata-se que, a probabilidade do rádio oportunista comunicar durante todo o tempo de duração da chamada é de 100%. Já o mesmo não acontece quando o rádio oportunista incrementa a sua P_o para -38 dBm, Figura 4-15. Neste caso, a probabilidade de comunicar durante 90 segundos desce para 50%, aproximadamente.

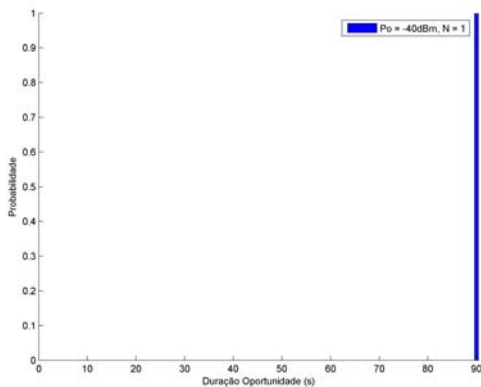


Figura 4-14 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-40$ dBm

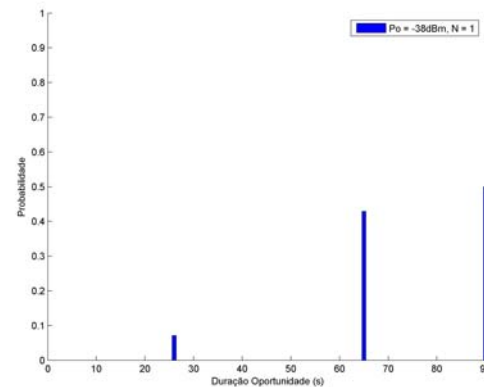


Figura 4-15 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-38$ dBm

Com base na Figura 4-16 e Figura 4-17, verifica-se que a probabilidade do rádio oportunista comunicar durante 90 segundos, para uma potência de emissão de -36 e -34 dBm, é de sensivelmente 40 e 18%, respectivamente. Ainda segundo as mesmas pode dizer-se que a probabilidade das oportunidades serem superiores a 20 segundos é de 100 e 49%, respectivamente.

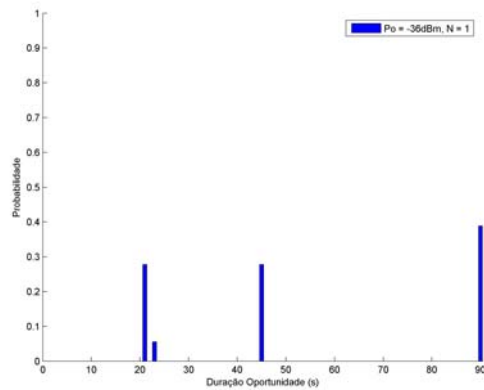


Figura 4-16 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-36$ dBm

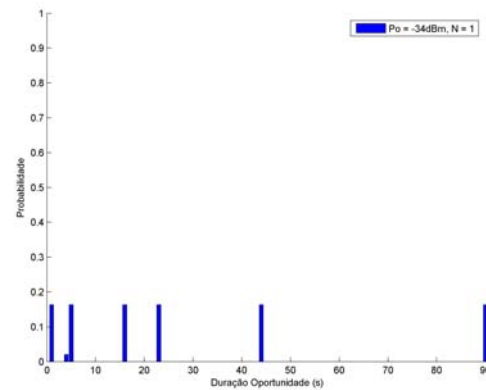


Figura 4-17 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-34$ dBm

Na Figura 4-18 ilustra-se a probabilidade em função da duração das oportunidades, para uma potência de emissão igual a -32 dBm. Neste contexto a probabilidade das oportunidades estarem acima de 20 segundos fica pelos 11%. Por outro lado, há aproximadamente 78% de probabilidade de existir uma oportunidade compreendida entre 0 e 2 segundos; ao aumentar a P_o para -30 dBm, Figura 4-19, a probabilidade nesse mesmo intervalo de tempo sobe para aproximadamente 100%.

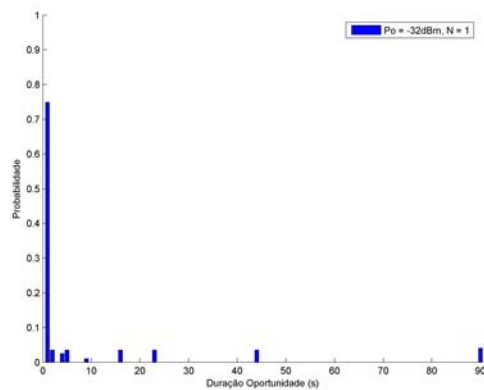


Figura 4-18 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-32$ dBm

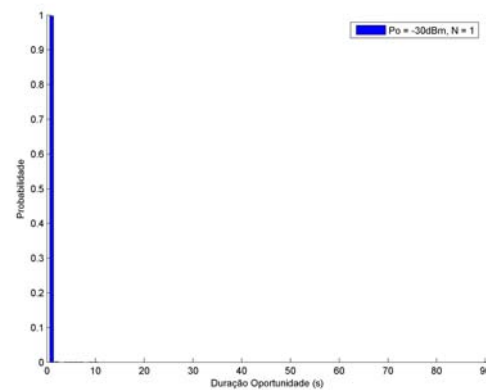


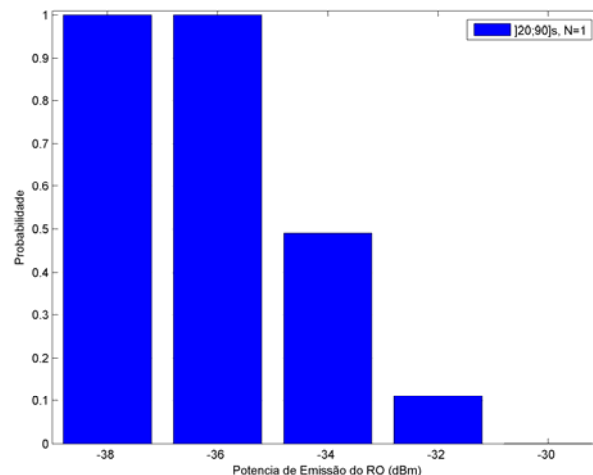
Figura 4-19 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=1$, e $P_o=-30$ dBm

Apresenta-se na Tabela 4-2 o resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade para as diferentes potências de emissão rádio oportunista consideradas nesta secção. Através da mesma, e como esperado, é visível que à medida que aumenta a potência de emissão, a duração das oportunidades tende para valores compreendidos entre 0 e 2 segundos.

Tabela 4-2 Tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=1$ e $P_o=[-40;-30]$ dBm

$N=1$ $\Delta t_o(s)$ P_o (dBm)	Probabilidade				
	[0;2]]2;5]]5;10]]10;20]]20;90]
-40	0	0	0	0	1
-38	0	0	0	0	1
-36	0	0	0	0	1
-34	0.1632	0.1837	0	0.1632	0.4899
-32	0.7839	0.0603	0.0100	0.0352	0.1106
-30	0.9986	0.0008	0.0004	0	0.0002

A Figura 4-20 representa a influência da potência de emissão rádio oportunista na probabilidade de existir uma oportunidade superior a 20 segundos, considerando 1 frequência disponível. Com base na mesma pode concluir-se que um rádio oportunista que pretenda comunicar durante pelo menos 20 segundos deve transmitir no máximo -36 dBm de potência.

**Figura 4-20** Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=1$, e $\Delta t_o =]20;90]$ s

Duração da Oportunidade considerando $N=2$

Nesta secção analisa-se a duração da oportunidade para duas frequências disponíveis.

Tal como pode verificar-se na Figura 4-21, a primeira potência de emissão considerada nesta secção é igual a -28 dBm. Quer isto dizer que para uma potência de emissão igual ou inferior a -30 dBm, a probabilidade do rádio oportunista comunicar durante os 90 segundos é de 100%. A Figura 4-21 apresenta, para uma P_o igual a -28 dBm, que há sensivelmente 60% de probabilidade da chamada não ser interrompida durante os 90 segundos. Por outro lado, se o rádio oportunista aumentar a sua potência de emissão para -26 dBm, a mesma duração de oportunidade é apenas garantida em 35% das vezes. Mesmo assim a probabilidade de existir uma oportunidade acima

de 20 segundos continua elevada, aproximadamente 82%.

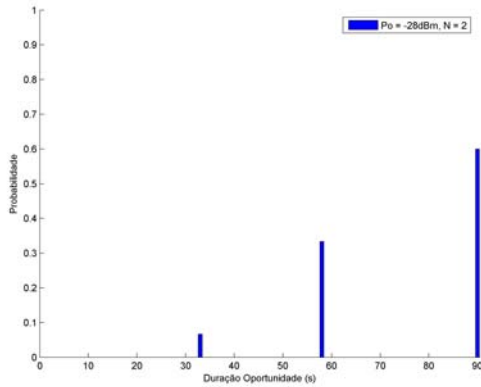


Figura 4-21 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-28$ dBm

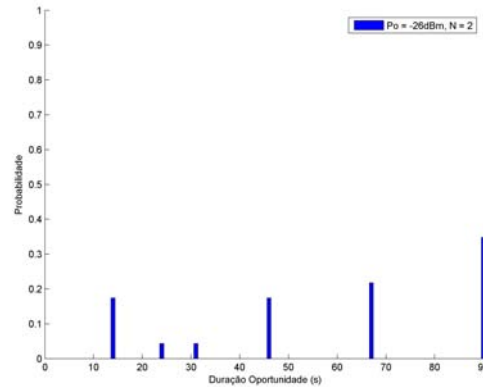


Figura 4-22 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-26$ dBm

Pela observação da Figura 4-23 verifica-se que a probabilidade do rádio oportunista comunicar durante 90 segundos, considerando uma potência de -24 dBm, é de apenas 9%. Neste cenário, a probabilidade das oportunidades serem superiores a 20 segundos ronda os 29%. Ao incrementar a P_o para -22 dBm, Figura 4-24, a mesma probabilidade é quase nula; em contrapartida a probabilidade das oportunidades estarem compreendidas entre 0 e 2 segundos atinge os 99%.

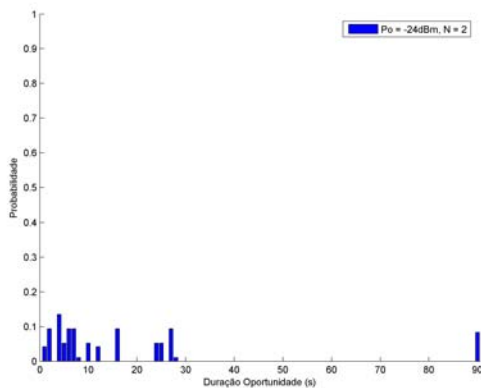


Figura 4-23 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-24$ dBm

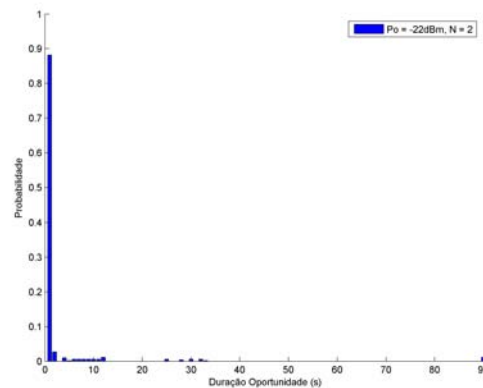


Figura 4-24 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=2$, e $P_o=-22$ dBm

A Tabela 4-3 representa a tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade para as diferentes potências de emissão rádio oportunista consideradas nesta secção. Através da Tabela 4-3 é notório, como esperado e verificado na secção anterior, que à medida que aumenta a potência de emissão, a duração das oportunidades tende para valores compreendidos entre 0 e 2 segundos. Pode dizer-se que um rádio oportunista que transmita uma potência igual ou inferior a -26 dBm para $N=2$, tem garantido uma duração de oportunidade superior a 10 segundos.

A Figura 4-25 exhibe a influência da potência de emissão rádio oportunista na probabilidade de existir uma oportunidade superior a 20 segundos, considerando 2 frequências disponíveis.

Como pode observar-se na Figura 4-25, para que um rádio oportunista comunique pelo menos 20 segundos, sem interrupções, este deve transmitir no máximo -28 dBm de potência.

Tabela 4-3 Tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=2$ e $P_o=[-30;-22]$ dBm

$N=2$		Probabilidade				
P_o (dBm)	Δt_o (s)	[0;2]]2;5]]5;10]]10;20]]20;90]
-30		0	0	0	0	1
-28		0	0	0	0	1
-26		0	0	0	0.1739	0.8261
-24		0.1355	0.1874	0.2500	0.1354	0.2917
-22		0.9940	0.0017	0.0017	0.0005	0.0021

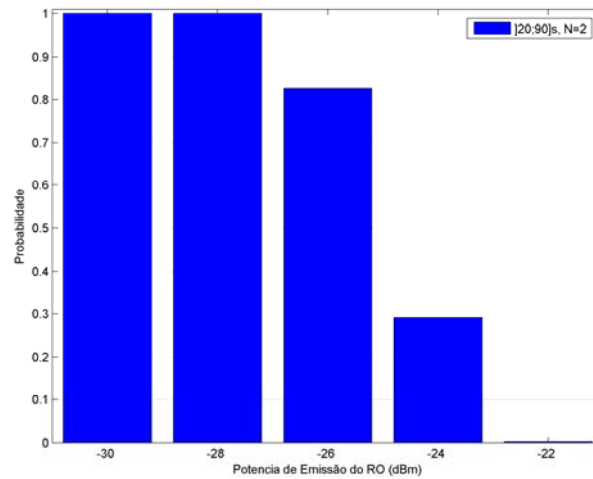


Figura 4-25 Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=2$, e $\Delta t_o =]20;90]$ s

Duração da Oportunidade considerando $N=3$

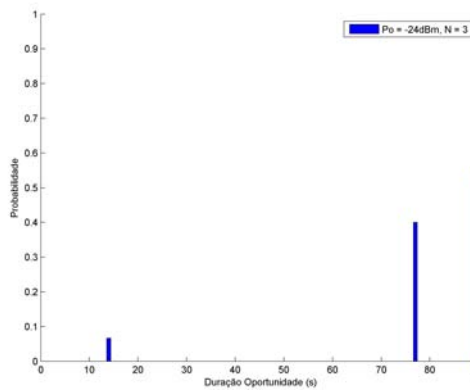


Figura 4-26 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-24$ dBm

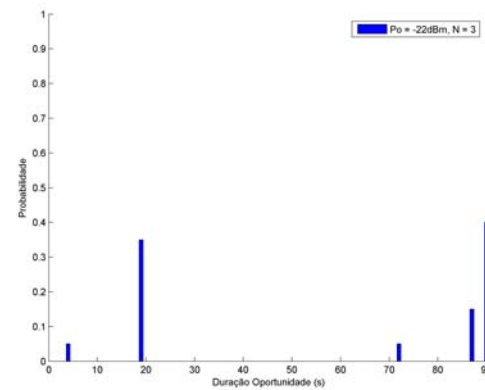


Figura 4-27 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-22$ dBm

Antes de mais, e segundo os resultados obtidos, constatou-se que para uma potência de emissão igual ou inferior a -26 dBm, a probabilidade do rádio oportunista comunicar durante 90 segundos é 100%.

Na Figura 4-26 e Figura 4-27 ilustram-se os resultados da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=3$ e $P_o = -24$ e -22 dBm, respectivamente. Para $P_o = -24$ e -22 dBm constata-se que há uma probabilidade de 55 e 40%, respectivamente, da chamada não ser interrompida durante os 90 segundos. Por outro lado, a probabilidade de existir uma oportunidade acima de 20 segundos ronda os 93 e os 60%, respectivamente.

Na Figura 4-28 ilustra-se a probabilidade em função da duração das oportunidades, para uma potência de emissão igual a -20 dBm. Neste cenário, a probabilidade da duração das oportunidades estar acima dos 20 segundos fica pelos 17%. Por conseguinte, há 50% de probabilidade de existir uma oportunidade compreendida entre 0 e 2 segundos. Ao aumentar a P_o para -18 dBm, Figura 4-29, a mesma probabilidade sobe para aproximadamente 99%.

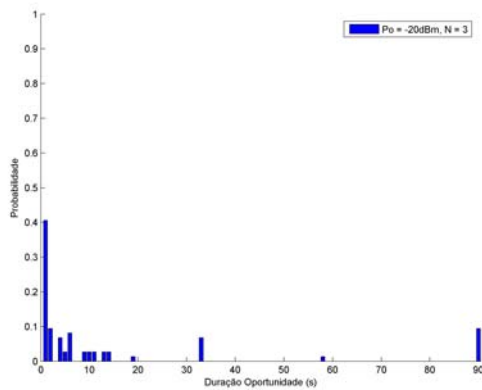


Figura 4-28 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-20$ dBm

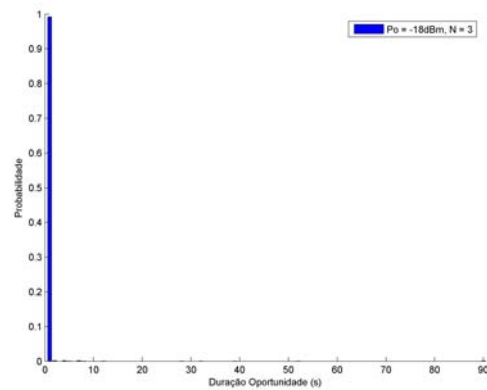


Figura 4-29 Probabilidade em função da duração da oportunidade para $N=3$, e $P_o=-18$ dBm

Tabela 4-4 Tabela resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para $N=3$ e $P_o=[-26;-18]$ dBm

$N=3$		Probabilidade				
P_o (dBm)	Δt_o (s)	[0;2]	[2;5]	[5;10]	[10;20]	[20;90]
-26		0	0	0	0	1
-24		0	0	0	0.0698	0.9302
-22		0	0.0503	0	0.3497	0.6000
-20		0.5000	0.0946	0.1351	0.0946	0.1757
-18		0.9940	0.0017	0.0017	0.0005	0.0021

Apresenta-se na Tabela 4-4 o resumo da probabilidade em função da duração da oportunidade, para as diferentes potências de emissão RO consideradas nesta secção.

Os resultados evidenciam, como esperado e verificado anteriormente, que à medida que aumenta a potência de emissão, a duração das oportunidades tende para valores compreendidos entre 0 e 2 segundos. Os resultados mostram ainda que um rádio oportunista que transmita uma potência igual ou inferior a -24 dBm para $N=3$, tem garantido uma duração de oportunidade superior a 10 segundos.

A Figura 4-30 ilustra a influência da potência de emissão rádio oportunista na probabilidade de existir uma oportunidade superior a 20 segundos, considerando 1, 2 e 3 frequências disponíveis. Pela análise da mesma conclui-se que, para existir uma duração de oportunidade acima de 20 segundos, o rádio oportunista deve transmitir no máximo -36 dBm caso só haja 1 frequência disponível, -28 dBm caso hajam 2 frequências disponíveis e -26 dBm para 3 frequências disponíveis. Posto isto, e no sentido de garantir a mesma duração de oportunidade, um rádio oportunista que opere numa frequência disponível f_i , pode transmitir mais 8 dBm de potência caso haja mais 1 frequência disponível e mais 10 dBm de potência caso hajam mais 2 frequências disponíveis.

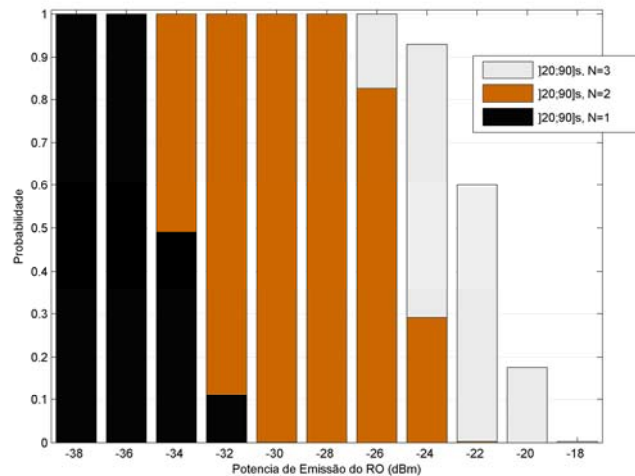


Figura 4-30 Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=1,2$ e 3 , e $\Delta t_o = [20;90]$ s

Em jeito de análise final, pode dizer-se que um rádio oportunista que pretenda comunicar durante 90 segundos, sem interrupções, deve transmitir no máximo -40 dBm para $N=1$, -30 dBm para $N=2$ e -26 dBm para $N=3$. Com base nesta análise deduz-se que à medida que aumenta o número de frequências disponíveis, aumenta a potência de emissão rádio oportunista permitida.

4.2.2.3 Duração da Interferência

No sentido de determinar os intervalos de tempo de transmissão T_{ii} , durante a chamada, no quais há interferência por parte do rádio oportunista, utiliza-se a métrica duração da interferência, definida na secção §3.3.2.2. Nestes termos, assume-se que o rádio oportunista transmite em todos os $T_{ii}(1...N_{iii})$ ainda que o mesmo interfira de forma prejudicial com os utilizadores primários.

Nesta secção efectuou-se um conjunto de simulações considerando apenas uma única frequência disponível. Desta forma garante-se que todas as interferências são contabilizadas, uma vez que não existem mais recursos espectrais. Os resultados obtidos através desse conjunto de simulações, apresentam-se nas figuras seguintes. A potência de emissão inicial é de 10 dBm, a qual é decrementada num passo de 10 dBm até atingir os -30 dBm.

Na Figura 4-31 ilustra-se a probabilidade em função da duração da interferência. Pela análise da mesma observa-se um dado curioso, i.e. há 99.96% de probabilidade da duração estar compreendida entre 0 e 1 segundo; isto assumindo que o rádio oportunista transmite à máxima potência, ou seja, o pior caso.

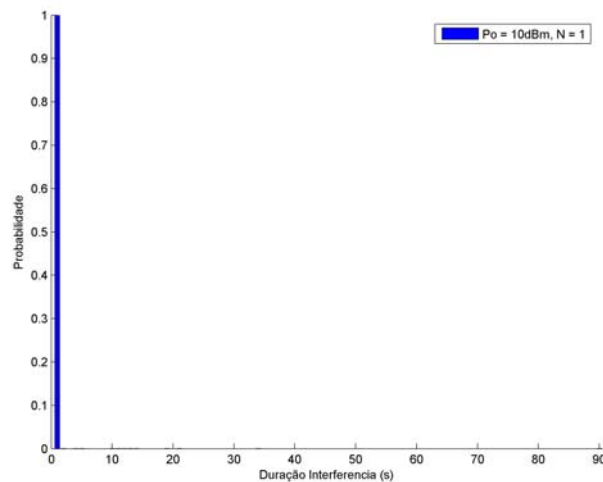


Figura 4-31 Probabilidade em função da duração da interferência para $N=1$, e $P_o=10$ dBm

Por forma a analisar estes resultados com mais detalhe, observou-se a duração da interferência entre 0 e 1 segundo.

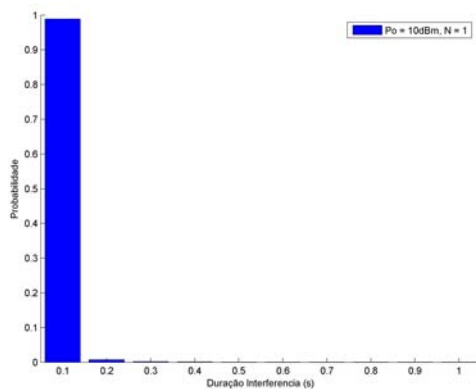


Figura 4-32 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 0 e 1s, para $N=1$, e $P_o=10$ dBm

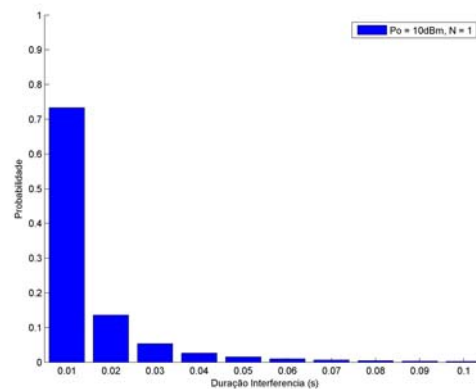


Figura 4-33 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 0 e 0.1s, para $N=1$, e $P_o=10$ dBm

Segundo a Figura 4-32, a qual apresenta a probabilidade em função da duração da interferência nesse intervalo de tempo, constata-se que há 98.88% de probabilidade de existir uma duração de

interferência inferior a 0.1 segundo. Na mesma linha de ideias analisou-se a duração da interferência entre 0 e 0.1 segundo.

Apresenta-se na Figura 4-33 a probabilidade em função da duração da interferência nesse intervalo de tempo. A análise da Figura 4-33 permite dizer que há 73.3% de probabilidade de existir uma duração de interferência inferior a 0.01 segundo, quando o rádio oportunista⁵ transmite à máxima potência

De modo a analisar a duração da interferência até à unidade de tempo mínima, i.e. T_{ti} , observou-se o intervalo [2;10] ms. A Figura 4-34 apresenta a probabilidade em função da duração da interferência nesse intervalo. Segundo a mesma aproximadamente 30% da interferência tem duração de 2 ms, considerando $P_o = 10$ dBm e $T_{cd} = 90$ segundos. É visível que a probabilidade diminui para durações de 2, 3, 4 e 5 T_{ti} .

No sentido de analisar o impacto da potência de emissão do rádio oportunista na duração da interferência, efectuaram-se simulações para diferentes valores de P_o .

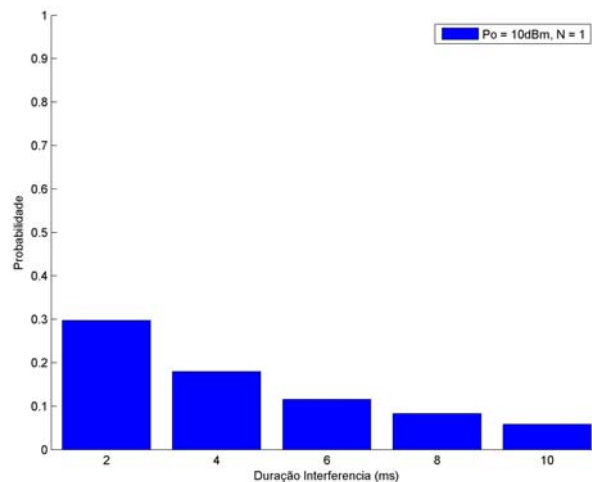


Figura 4-34 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=10$ dBm

Ilustra-se na Figura 4-35 e Figura 4-36 a probabilidade em função da duração da interferência no intervalo [2;10] ms, considerando $P_o = 0$ e -10 dBm, respectivamente. Da análise comparativa destas figuras depreende-se que a probabilidade de existir uma duração de interferência igual a 2 ms, aumenta com a diminuição da potência de emissão.

⁵ UMTS TDD (classe de potência 4)

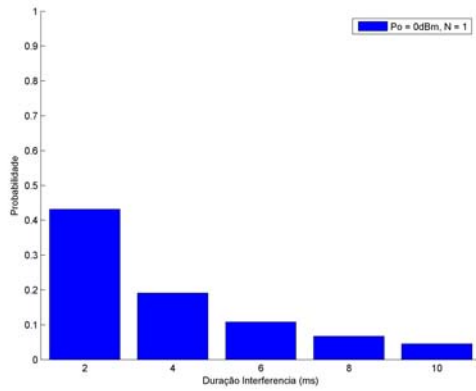


Figura 4-35 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=0$ dBm

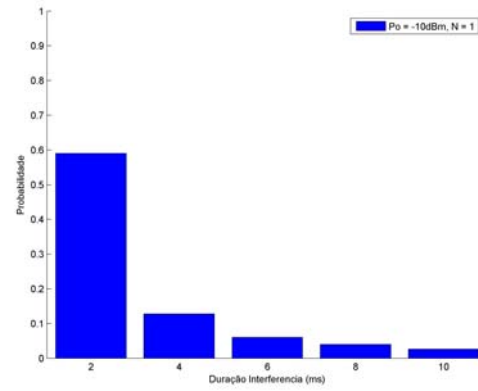


Figura 4-36 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=-10$ dBm

A Figura 4-37 e Figura 4-38 mostram a probabilidade em função da duração da interferência no intervalo [2;10] ms, para uma $P_o = -20$ e -30 dBm, respectivamente. Mais uma vez é evidente que a diminuição da potência de emissão leva a que a duração da interferência tenda para 2 ms. Obviamente, a probabilidade de ocorrerem durações de interferência superiores a 2 ms diminui.

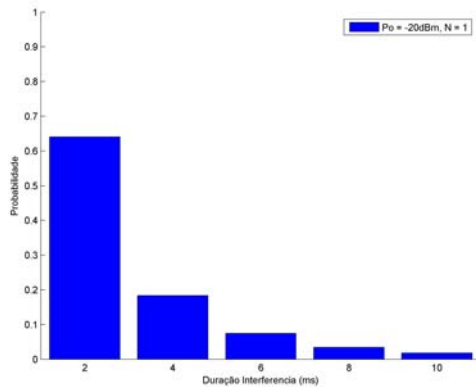


Figura 4-37 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=-20$ dBm

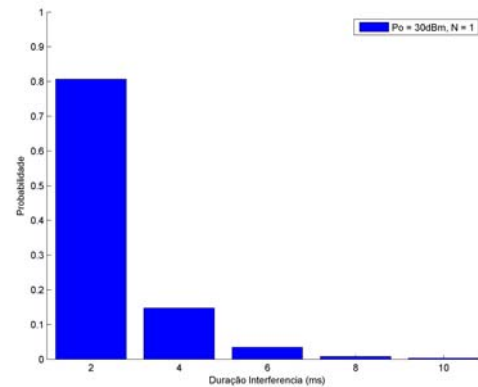


Figura 4-38 Probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$, e $P_o=-30$ dBm

Tabela 4-5 Tabela resumo da probabilidade em função da duração da interferência, para $N=1$ e $P_o=[10;-30]$ dBm

$N=1$		Probabilidade		
P_o (dBm)	Δt_i (s)			
		[0;1]	[0;0.1]	[0;0.01]
10		0.9996	0.9888	0.7330
0		-	-	0.8433
-10		-	-	0.8446
-20		-	-	0.9511
-30		-	-	0.9997

A Tabela 4-5 apresenta o resumo da probabilidade em função da duração da interferência, para as diferentes potências de emissão rádio oportunista consideradas nesta secção. Verifica-se que a probabilidade da duração da interferência estar compreendida entre 0 e 0.01 segundo aumenta e atinge sensivelmente 100%, para $P_o = -30$ dBm.

A Tabela 4-6 resume a probabilidade em função da duração da interferência (entre [2;10] ms), para as várias potências de emissão consideradas. Note-se que a probabilidade de existir uma duração de interferência igual a 4 ms, não varia ou quase não varia, com a diminuição da P_o , ao contrário daquilo que sucede com as durações de 6, 8 e 10 ms.

Tabela 4-6 Tabela resumo da probabilidade em função da duração da interferência, entre 2 e 10 ms, para $N=1$ e $P_o = [-10; -30]$ dBm

$N=1$	Probabilidade					
Δt_i (ms) P_o (dBm)	2	4	6	8	10	Total
10	0.2973	0.1793	0.1155	0.0826	0.0586	0.7330
0	0.4315	0.1910	0.1082	0.0672	0.0454	0.8433
-10	0.5899	0.1280	0.0602	0.0401	0.0264	0.8446
-20	0.6404	0.1835	0.0744	0.0345	0.0183	0.9511
-30	0.8066	0.1476	0.0346	0.0078	0.0031	0.9997

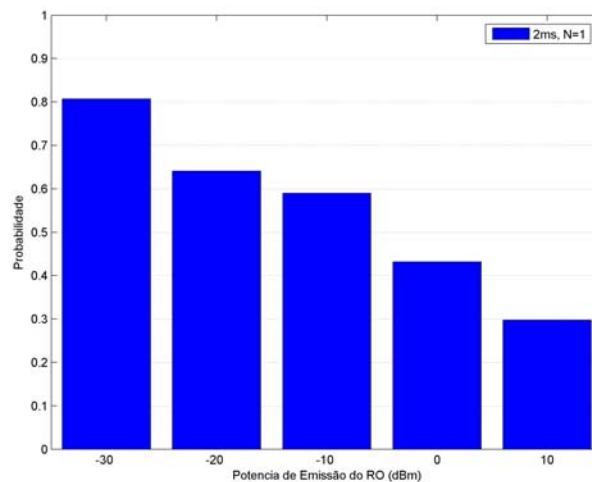


Figura 4-39 Probabilidade em função da potência de emissão do RO para $N=1$ e $\Delta t_i = 2$ ms

A Figura 4-39 representa a influência da potência de emissão rádio oportunista na probabilidade de existir uma interferência igual a 2 ms, para $N=1$. Saliente-se que para potências iguais ou inferiores a -10 dBm, a probabilidade está sempre acima dos 58%, atingindo mesmo os 80% para $P_o = -30$ dBm. Assim, à medida que diminui a potência de emissão do rádio oportunista, diminui a duração da interferência.

Repare-se que, caso os utilizadores primários estejam preparados para tolerar uma interferência rádio oportunista durante 2 ms, a duração da oportunidade pode aumentar consideravelmente. Esse aumento será, sem dúvida, mais evidente para potências de emissão iguais ou inferiores a -10 dBm.

Em jeito de síntese, pode dizer-se que a interferência é traduzida em grande parte por durações de 2 ms. Refira-se que, essa quota parte aumenta à medida que a potência de emissão do rádio oportunista diminui.

4.2.2.4 Probabilidade de Transição

De modo a determinar a probabilidade de um rádio oportunista comutar de frequência de portadora, utiliza-se a métrica probabilidade de transição definida na secção §3.3.2.3.

Nesta secção realizou-se um conjunto de simulações considerando a inexistência de recursos rádio disponíveis na rede UMTS TDD mas, por outro lado, a existência de 2 frequências UMTS FDD disponíveis para a comunicação rádio oportunista. Desta forma pode analisar-se o comportamento do rádio oportunista, em termos de frequência de portadora, mantendo o número de transições possíveis num valor aceitável (ex.: $N=3 \Leftrightarrow 15$ transições).

A Figura 4-40 representa a cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando $N=2$.

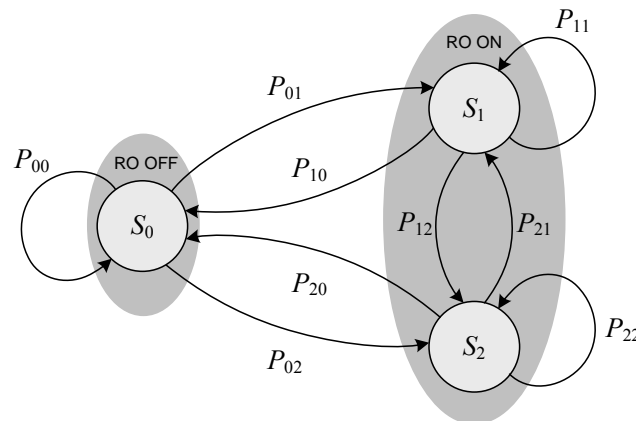


Figura 4-40 Cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando $N=2$

Apresentam-se nas figuras seguintes os resultados obtidos para cada transição de frequência de portadora possível. Assume-se uma potência de emissão inicial de -30 dBm; essa potência é incrementada, em intervalos de 10 dBm, até atingir o valor máximo definido na Tabela 4-1.

Como exemplo dos resultados a Figura 4-41 ilustra a probabilidade de cada transição de frequência de portadora, considerando uma potência de emissão de -30 dBm.

Como pode observar-se a probabilidade do rádio oportunista transitar para a frequência f_0 é nula

($\sum_{i=0}^N P_{i0} = 0$), o que é o mesmo que dizer que o rádio oportunista comunica durante os 90

segundos. Constatase ainda que ambas as frequências disponíveis são usadas pelo rádio oportunista durante o tempo de duração da chamada T_{cd} . Quase a totalidade (cerca de 99.98%) das transições com origem em f_1 têm como destino essa mesma frequência; os restantes 0,02% correspondem às transições entre f_1 e f_2 . De igual modo 99.98% das transições oriundas da frequência f_2 têm como destino a frequência f_2 ; por sua vez os restantes 0.02% representam as transições entre f_2 e f_1 .

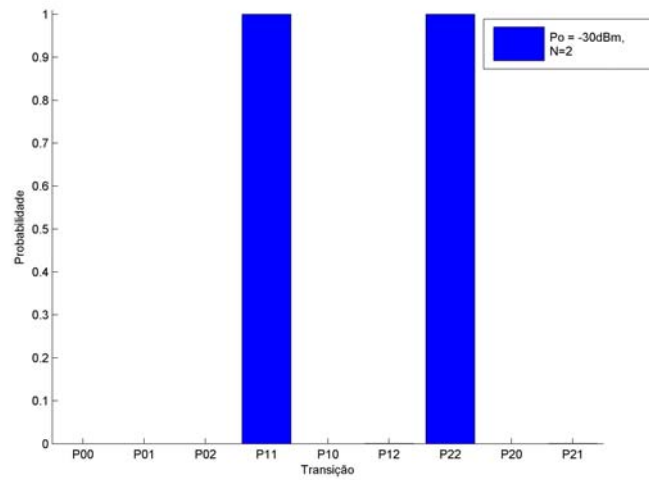


Figura 4-41 Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o = -30$ dBm

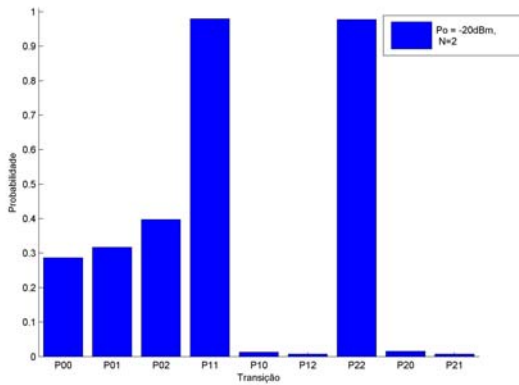


Figura 4-42 Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o = -20$ dBm

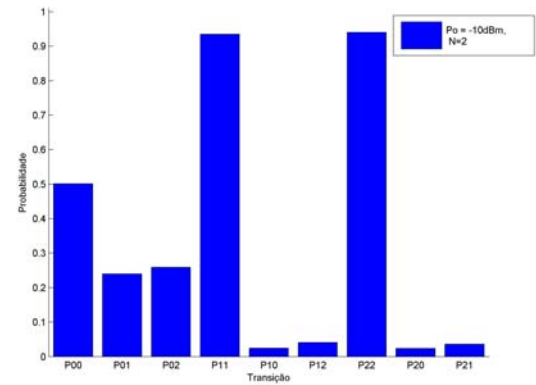


Figura 4-43 Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o = -10$ dBm

A Figura 4-42 e Figura 4-43 apresentam as probabilidades de transição considerando uma potência de emissão rádio oportunista de -20 e -10 dBm, respectivamente. Como se constata pela análise da Figura 4-42 e Figura 4-43, à medida que aumenta a potência de emissão, aumenta a probabilidade de transição do modo *on* para o modo *off* (P_{10} e P_{20}); consequentemente,

a probabilidade de transição do modo *off* para o modo *on* diminui (P_{01} e P_{02}).

A Figura 4-44 e Figura 4-45 ilustram os resultados das probabilidades de transição para uma potência de emissão de 0 e 10 dBm, respectivamente. Estas figuras vêm reforçar a tendência verificada na Figura 4-42 e Figura 4-43. Mais ainda, ilustram que o aumento da potência de emissão conduz ao aumento da probabilidade da portadora continuar em f_0 (P_{00}), em detrimento da probabilidade da portadora continuar em f_1 e f_2 (P_{11} e P_{22} , respectivamente).

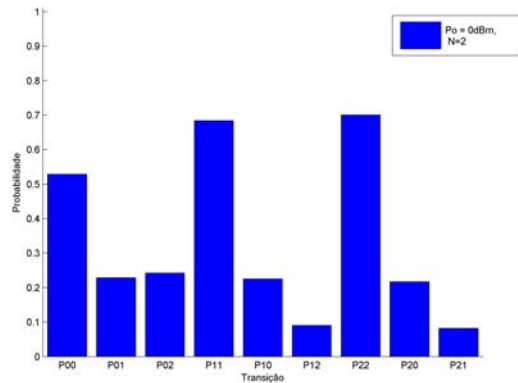


Figura 4-44 Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=0$ dBm

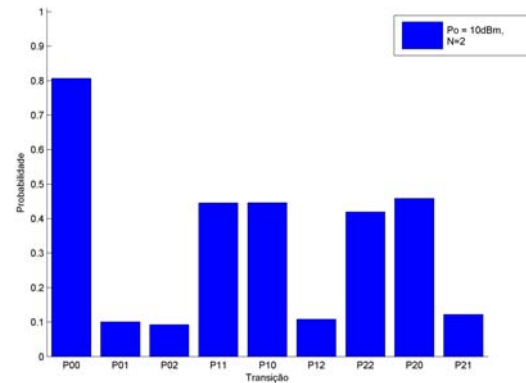


Figura 4-45 Probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$, e $P_o=10$ dBm

A Tabela 4-7 resume a probabilidade de transição entre todos os estados possíveis para as várias potências de emissão consideradas.

Pela observação da Tabela 4-7 constata-se, tal como se antevia, que à medida que aumenta a potência de emissão, aumenta a probabilidade do rádio oportunista não comunicar, i.e. P_{00} , P_{10} e P_{20} ; em contrapartida P_{11} e P_{22} tendem a diminuir. É de frisar que à medida que aumenta a potência de emissão, aumenta a probabilidade de transição entre frequências disponíveis (P_{12} e P_{21}). Como verificado na secção §4.2.2.2, a duração das oportunidades é muito curta para valores de potência de emissão elevados; razão pela qual, o rádio oportunista é obrigado a comutar amiudadamente a sua frequência de portadora.

Tabela 4-7 Tabela resumo da probabilidade de cada transição de frequência de portadora, para $N=2$ e $P_o=[-30;10]$ dBm

$N=2$	Probabilidade								
Transição P_o (dBm)	\hat{P}_{00}	\hat{P}_{01}	\hat{P}_{02}	\hat{P}_{11}	\hat{P}_{10}	\hat{P}_{12}	\hat{P}_{22}	\hat{P}_{20}	\hat{P}_{21}
-30	0	0	0	0.9998	0	0.0002	0.9998	0	0.0002
-20	0.2864	0.3166	0.3970	0.9796	0.0130	0.0074	0.9771	0.0157	0.0072
-10	0.5011	0.2396	0.2593	0.9348	0.0242	0.0410	0.9402	0.0234	0.0364
0	0.5285	0.2287	0.2428	0.6844	0.2252	0.0904	0.7006	0.2173	0.0821
10	0.8069	0.1008	0.0923	0.4453	0.4460	0.1087	0.4191	0.4589	0.1220

Com base nas probabilidades de transição (Tabela 4-7), pode equacionar-se a expressão (3-28) para $N=2$

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \pi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \pi_2 \end{bmatrix}. \quad (4-5)$$

As probabilidades π_0 , π_1 e π_2 são obtidas através da resolução do conjunto de equações

$$\begin{aligned} \pi_0 &= P_{00}\pi_0 + P_{01}\pi_1 + P_{02}\pi_2 \\ \pi_1 &= P_{10}\pi_0 + P_{11}\pi_1 + P_{12}\pi_2, \\ \pi_2 &= P_{20}\pi_0 + P_{21}\pi_1 + P_{22}\pi_2 \end{aligned} \quad (4-6)$$

sendo que

$$\pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1. \quad (4-7)$$

Resolvendo as equações, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 4-8.

Tabela 4-8 Probabilidades π_0 , π_1 e π_2 , em função da P_o , para $N=2$

P_o (dBm)	π_0	π_1	π_2
-30	0	0.4620	0.5380
-20	0.0142	0.4847	0.5011
-10	0.0455	0.4496	0.5049
0	0.3192	0.3241	0.3567
10	0.7007	0.1583	0.1410

Através da Tabela 4-8 e da expressão (3-29), pode calcular-se a probabilidade de comunicação e respectivo tempo de comunicação.

Tabela 4-9 Probabilidade de comunicação ($1-\pi_0$) e respectivo tempo de comunicação, em função da P_o , para $N=2$

P_o (dBm)	$P_c = 1-\pi_0$	T_c (s)
-30	1	90
-20	0.9858	88.21
-10	0.9545	85.91
0	0.6808	61.27
10	0.2993	26.94

A Tabela 4-9 apresenta os resultados da probabilidade de comunicação e respectivo tempo de comunicação em função da potência emitida pelo rádio oportunista.

A Figura 4-46 representa o tempo de comunicação em função da potência de emissão do rádio oportunista, determinado com base nas métricas T_c e $(1-\pi_0)T_{cd}$. Como pode verificar-se, as curvas obtidas com base nas diferentes métricas coincidem.

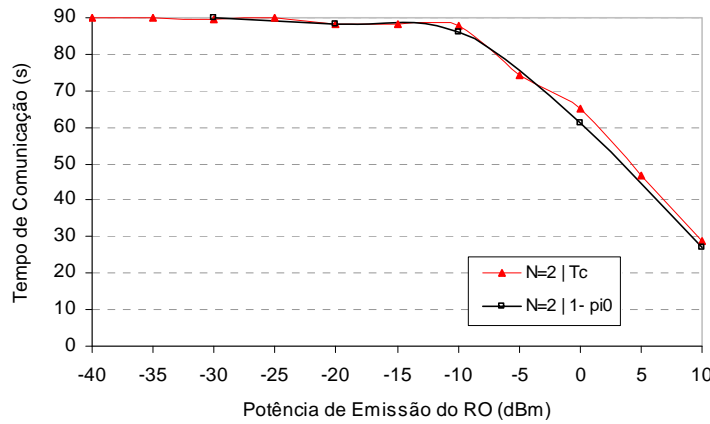


Figura 4-46 Tempo de comunicação em função da potência de emissão do rádio oportunista, determinada com base nas métricas T_c e $(1-\pi_0)T_{cd}$

A Figura 4-47 ilustra os resultados apresentados na Tabela 4-8. Como é patente, a probabilidade do rádio oportunista comunicar na frequência f_1 e f_2 (π_1 e π_2 , respectivamente), diminui com o aumento da sua potência de emissão. Note-se que ao considerar o número de simulações a tender para infinito, a probabilidade de comunicar em f_1 ou f_2 tenderia para um mesmo valor; isto porque as oportunidades nas diferentes frequências disponíveis são uniformes. A título de exemplo, para $P_o=-30$ dBm dever-se-ia verificar $P_c(f_1)=P_c(f_2)=0.5$, dado que $P_c=P_c(f_1)+P_c(f_2)$.

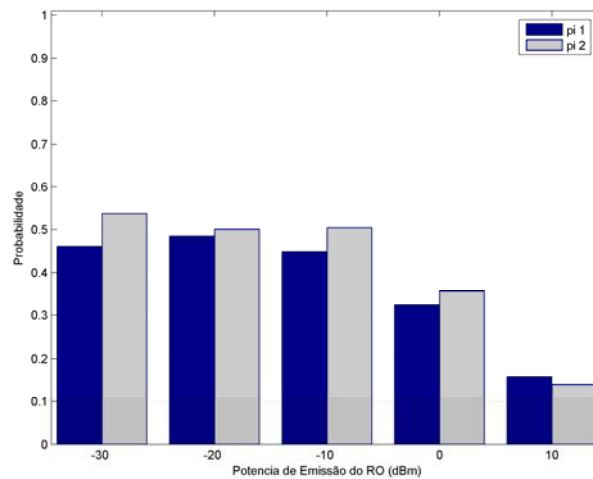


Figura 4-47 π_1 e π_2 em função da potência de emissão do RO, para $N=2$

Com base nos resultados de probabilidade de transição obtidos, pode determinar-se o tempo médio em que o rádio oportunista permanece no modo *off* e *on* (S_0 e S_A , respectivamente), bem

como a duração média entre transições de frequência.

Segundo a cadeia de Markov, $\alpha=P_{00}$, $\beta(1-q)=P_{11}=P_{22}$ e $\beta=P_{11}+P_{12}=P_{22}+P_{21}$. Contudo na prática, devido ao número finito de simulações, os resultados mostram $\hat{P}_{11} \neq \hat{P}_{22}$ e $\hat{P}_{12} \neq \hat{P}_{21}$. Assumindo que \hat{P}_{ij} equivale à P_{ij} obtida por meio de simulações, usou-se $P_{11}=P_{22}=(\hat{P}_{11} + \hat{P}_{22})/2$ e $P_{12}=P_{21}=(\hat{P}_{12} + \hat{P}_{21})/2$.

A Tabela 4-10 apresenta os resultados relacionados com o tempo médio em que a frequência de portadora do rádio oportunista permanece no estado S_0 , S_A e a duração média entre transições de frequência.

A Tabela 4-10 ilustra, como se antevia, que o tempo médio de comunicação $T(S_A)$ diminui com o aumento da potência emitida pelo rádio oportunista; em contrapartida, o tempo médio sem comunicação $T(S_0)$ aumenta. Para alcançar um tempo de comunicação igual à duração da chamada, o rádio oportunista deve transmitir no máximo -30 dBm. Neste condições, a transição entre frequências disponíveis ocorre de 10 em 10 segundos. Repare-se que, para $P_o = -20$ dBm, o tempo médio de comunicação é de aproximadamente 137 ms, no entanto, a duração média entre transições é de 270 ms (sensivelmente o dobro); isto significa que apenas há transições entre $f_1 \rightarrow f_2$ e vice-versa, de duas em duas “visitas” ao estado S_A . Por outro lado, significa que de duas em duas “visitas” a esse mesmo estado, a frequência de portadora do rádio oportunista permanece em f_1 ou f_2 durante aproximadamente 137 ms.

Tabela 4-10 Tempo médio $T(S_0)$, $T(S_A)$ e duração média $\Delta t_{S_1, S_2}$, em função da P_o , para $N=2$

P_o (dBm)	$T(S_0)$ (ms)	$T(S_A)$ (ms)	$\Delta t_{S_1, S_2}$ (ms)
-30	0	90×10^3	10×10^3
-20	0.80	137.37	270.04
-10	2.00	82.03	50.45
0	2.24	7.04	18.06
10	8.36	2.42	9.50

Ainda com base na Tabela 4-10 verifica-se que o tempo médio em que a frequência de portadora do rádio oportunista permanece no estado S_0 para uma P_o igual ou inferior a -10 dBm, é no máximo 2 ms. Este dado vem reforçar a dedução retirada na secção §4.2.2.3, i.e. a duração da oportunidade (a qual é equivalente ao $T(S_A)$) pode aumentar consideravelmente caso os utilizadores primários estejam preparados para tolerar uma duração de interferência (a qual é equivalente ao $T(S_0)$) de 2 ms. De uma forma geral os resultados apresentados na Tabela 4-10 mostram que a potência de emissão rádio oportunista tem um peso considerável no tempo médio

em que a sua frequência de portadora permanece em cada estado. Importa salientar que valores da Tabela 4-10 podem ser usados para estabelecer uma relação entre um tipo de serviço e um limite de potência de emissão.

5

Conclusões

Esta dissertação abarca essencialmente o desafio de partilha de espectro entre sistemas primários licenciados e utilizadores secundários não-licenciados, como também a inclusão destes últimos num simulador de sistema baseado em UMTS; dado que a avaliação realista da coexistência destes sistemas só é possível pelo recurso à simulação.

A tecnologia dos utilizadores secundários considerada neste trabalho é revista em duas partes. A primeira parte aborda o conceito lato de Rádio Cognitivo, permitindo desta forma tomar conhecimento das características, capacidades, vantagens e desvantagens destes sistemas. A segunda parte centra-se no conceito de Rádio Cognitivo no sentido estrito, onde se realçam as propriedades e o estado da arte desta tecnologia. Termina-se a abordagem com uma breve referência às várias técnicas de detecção de espectro e respectivos desafios. Por último, apresenta-se o cenário considerado para avaliar a viabilidade da comunicação rádio oportunista.

Apresentaram-se os blocos de maior interesse da arquitectura do simulador, focando os seus diferentes domínios/categorias, no sentido de caracterizar e clarificar o sistema primário considerado. Apresentaram-se ainda os dois modos de funcionamento rádio oportunista implementados. O primeiro modo, estático, assume que os utilizadores primários estão fixos e que o rádio oportunista (virtual) percorre todas as posições da célula de modo a calcular os mapas de interferência permitida. O segundo modo, dinâmico, considera uma chamada rádio oportunista durante a qual os utilizadores se movimentam, incluindo o próprio rádio oportunista. A inclusão dos rádios oportunistas no simulador de sistema consiste essencialmente no cálculo das regiões/posições permitidas para as frequências licenciadas disponíveis, cálculo esse que tem por base os requisitos da relação sinal interferência dos utilizadores primários. Com base nos modos de funcionamento propuseram-se e discutiram-se métricas simples para a avaliação das oportunidades de comunicação rádio oportunista.

Tendo presente o principal objectivo desta dissertação, realizou-se um conjunto de simulações no sentido de analisar as métricas propostas e consequentemente avaliar e caracterizar as oportunidades de comunicação rádio oportunista em ambientes celulares UMTS. De uma forma geral pretendeu-se demonstrar o impacto das frequências licenciadas e da potência de emissão do rádio oportunista nas oportunidades de comunicação. Tornou-se, assim, possível relacionar

frequências licenciadas disponíveis com potência de emissão, em função da duração ou tipo de oportunidades pretendidas. Tipo de oportunidade, neste contexto, relaciona-se com estabilidade da frequência de portadora.

Os primeiros resultados apresentados referem-se ao modo estático de funcionamento, nomeadamente à probabilidade de comunicação, que corresponde à probabilidade de um rádio oportunista largado numa posição aleatória da célula, no instante t_q , não perturbar a comunicação existente na rede primária; ou seja, a probabilidade da comunicação rádio oportunista não ser bloqueada por limitações da rede primária. Verificou-se que o número de oportunidades de comunicação cresce rapidamente com o número de frequências licenciadas disponíveis, embora o rádio oportunista deva ainda moderar a sua potência de emissão, caso pretenda alcançar probabilidades de comunicação elevadas. Os resultados evidenciaram, tal como esperado, que quanto menor a potência emitida pelo rádio oportunista, maior a probabilidade do mesmo comunicar.

As métricas definidas no modo dinâmico de funcionamento tiveram por base uma chamada rádio oportunista. Os primeiros resultados analisados neste contexto dizem respeito ao tempo de comunicação, o qual corresponde à soma dos intervalos de tempo, durante a chamada rádio oportunista, em que houve comunicação por parte do rádio oportunista. Tal como no modo estático, verificou-se que as oportunidades, neste caso avaliadas pelo tempo de comunicação, aumentam em função do número de frequências licenciadas disponíveis. Os resultados demonstraram também a degradação do tempo de comunicação com o aumento da potência de emissão, no entanto, constatou-se que essa degradação pode ser compensada com o aumento do número de frequências licenciadas disponíveis. Dado esta métrica não contemplar o tempo de comunicação sem interrupção, analisou-se posteriormente a duração da oportunidade.

A duração da oportunidade corresponde ao intervalo de tempo no qual a comunicação rádio oportunista não é interrompida, isto é, intervalo de tempo sem qualquer bloqueio por parte da rede primária. Os resultados obtidos mostram que o aumento da potência de emissão do rádio oportunista degrada a duração da oportunidade, ou seja, leva a que as oportunidades tendam para valores compreendidos entre 0 e 1 segundo. Os resultados mostram ainda que a potência de emissão máxima, que garante uma oportunidade com duração igual ao tempo de duração da chamada considerada, aumenta à medida que aumenta o número de frequências disponíveis, sendo de salientar que esse aumento pode mesmo atingir valores da ordem das dezenas de dBm. Posto isto, e com base nas frequências disponíveis numa determinada área geográfica, o rádio oportunista pode estabelecer o seu limite máximo de potência de emissão que garanta a duração de oportunidade pretendida. Estes dados podem ser úteis para antecipar a viabilidade da comunicação do rádio oportunista, ou seja, antes mesmo de iniciar a comunicação, o rádio oportunista pode comparar a potência máxima permitida pela rede primária com a potência mínima requerida pela estação base rádio oportunista e, com base nisso, decidir.

Outro dos resultados obtidos é a duração da interferência nos utilizadores primários licenciados. Neste contexto assume-se que o rádio oportunista transmite em todos os intervalos de tempo, incluindo aqueles em que interfere de forma prejudicial com os utilizadores primários. Os resultados preliminares evidenciam um dado curioso, isto é, mostram que os valores do tempo de duração da interferência estão compreendidos entre 0 e 1 segundo, no entanto, ao analisar estes valores com mais detalhe, constatou-se que uma percentagem considerável da interferência tem duração igual a um intervalo de tempo de transmissão, percentagem essa que aumenta à medida que diminui a potência de emissão do rádio oportunista. Assim sendo, pode depreender-se que quanto menor a potência de emissão, menor o tempo de duração da interferência. Através destes resultados, e estabelecendo uma ligação com o tempo de duração da oportunidade, deduz-se facilmente que este último pode aumentar significativamente caso os utilizadores primários estejam preparados para tolerar interferência com duração igual a 2 ms, sendo que esse aumento/ganho será com certeza mais notório para baixas potências de emissão.

Por último, analisou-se a probabilidade do rádio oportunista comutar de estado/frequência durante o tempo de duração da chamada. Nesta análise considerou-se um número de frequências disponíveis fixo e igual a 2. Os resultados obtidos mostram que o aumento da potência de emissão, aumenta a probabilidade do rádio oportunista manter-se no estado 0, i.e. não comunicar. Verificou-se que para potências de emissão baixas, a probabilidade de transição entre estados diferentes também é baixa, isto porque existem muitas oportunidades de comunicação nas frequências disponíveis, logo o rádio oportunista não necessita de alterar a sua portadora tão frequentemente. Por outro lado, quando as oportunidades são escassas/curtas, i.e. potência de emissão elevada, o rádio oportunista necessita de alterar frequentemente a sua portadora por forma a evitar que a chamada caia.

Com base nos valores de probabilidade de transição obtidos determinou-se o tempo médio em que a frequência de portadora do rádio oportunista permanece no modo *on*, *off* bem como a duração média entre transições de frequência. Os resultados obtidos revelam que estas métricas são bastante susceptíveis à potência de emissão rádio oportunista. Estes resultados podem ser úteis para estabelecer uma relação entre um tipo de serviço e um limite de potência de emissão.

Finalmente, pensa-se que o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação tenha contribuído para o avanço do estado da arte de sistemas rádios oportunistas em bandas de frequência licenciadas, designadamente na caracterização das oportunidades de comunicação rádio oportunista em ambientes celulares UMTS.

No enquadramento desta dissertação existem ainda vários aspectos que podem ser aprofundados. Não se pretende enumerar todos os assuntos que merecem uma investigação mais cuidada, mas sim, apresentar algumas preferências que de momento parecem merecedoras de dedicação. Destacam-se, por isso, os seguintes tópicos:

- Introdução de uma fonte de erros no algoritmo de localização dos utilizadores primários e respectivo rádio oportunista.
- Determinação do canal de propagação entre o rádio oportunista e cada utilizador primário recorrendo a um modelo de canal simples, tendo por base a localização dos respectivos terminais.
- Introdução de mais rádios oportunistas no sistema.
- Avaliação da interferência causada pelos utilizadores primários nos rádios oportunistas.

A

Derivações

A.1 Expressão (3-32)

Nesta secção, apresenta-se a derivação da expressão (3-32), a qual devolve o número médio de transições desde que a frequência de portadora sai do estado S_0 até que regresse ao estado S_0 .

A Figura A-1 representa a cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, onde

- S_{in} : representa o estado inicial;
- S_0 : representa o estado correspondente à frequência f_0 ;
- S_f : representa o estado final;
- $S_{in} = S_f = S_0$ e $S_A = S_1 \cup S_2$;
- α : representa a probabilidade de transição de S_0 para S_0 ;
- β : representa a probabilidade de transição de S_A para S_A ;
- D_t : representa a iteração;
- x : identifica o tempo passado em S_0 , e
- y : o tempo passado em S_A .

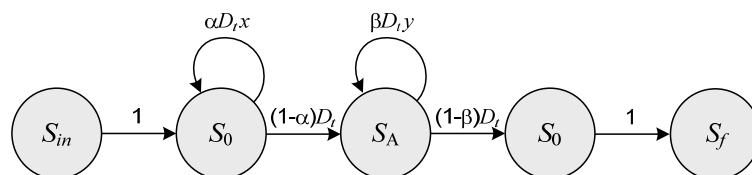


Figura A-1 Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista

O modelo da Figura A-1 permite calcular o tempo médio desde que a frequência de portadora sai do estado S_0 até que regresse ao estado S_0 . Segundo o mesmo,

$$S_0 = S_{in} + \alpha D_t x S_0 \Rightarrow S_0 = \frac{S_{in}}{1 - \alpha D_t x}, \quad (A-1)$$

$$S_A = (1 - \alpha) D_t \frac{S_{in}}{1 - \alpha D_t x} + \beta D_t y S_A = \frac{(1 - \alpha) D_t S_{in}}{(1 - \alpha D_t x)(1 - \beta D_t y)}, \quad (A-2)$$

e

$$S_f = \frac{(1 - \beta)(1 - \alpha) D_t^2 S_{in}}{(1 - \alpha D_t x)(1 - \beta D_t y)}. \quad (A-3)$$

Ao ignorar o tempo passado em S_0 e S_A , a expressão (A-3) vem traduzida por,

$$S_f = \frac{(1 - \beta)(1 - \alpha) D_t^2 S_{in}}{1 - (\alpha + \beta) D_t + \alpha \beta D_t^2}. \quad (A-4)$$

Se,

$$\frac{1}{(1 - \alpha D_t)(1 - \beta D_t)} = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} \frac{1}{1 - \alpha D_t} - \frac{\beta}{\alpha - \beta} \frac{1}{1 - \beta D_t}, \quad (A-5)$$

então,

$$S_f = (1 - \beta)(1 - \alpha) \frac{\alpha}{\alpha - \beta} D_t^2 (1 + \alpha D_t + \alpha^2 D_t^2 + \dots) - (1 - \beta)(1 - \alpha) \frac{\beta}{\alpha - \beta} D_t^2 (1 + \beta D_t + \beta^2 D_t^2 + \dots) \quad (A-6)$$

ou seja,

$$S_f = \frac{(1 - \alpha)(1 - \beta)}{\alpha - \beta} D_t^2 \{ \alpha - \beta + (\alpha^2 - \beta^2) D_t + (\alpha^3 - \beta^3) D_t^2 + \dots \}. \quad (A-7)$$

Considerando $D_t=1$, a probabilidade de ocorrerem n transições, é descrita por

$$P(n) = \frac{(1 - \alpha)(1 - \beta)}{\alpha - \beta} (\alpha^{n-1} - \beta^{n-1}), \quad n \geq 2. \quad (A-8)$$

Logo, o número médio de transições vem definido por,

$$E(n) = \frac{(1 - \alpha)(1 - \beta)}{\alpha - \beta} \sum_{n=2}^{\infty} n (\alpha^{n-1} - \beta^{n-1}). \quad (A-9)$$

Se,

$$\sum_{n=2}^{\infty} \alpha^{n-1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \text{ e } \sum_{n=2}^{\infty} \beta^{n-1} = \frac{\beta}{1 - \beta}, \quad (A-10)$$

então,

$$\sum_{n=2}^{\infty} P(n) = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha-\beta} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} - \frac{\beta}{1-\beta} \right) = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha-\beta} \frac{\alpha-\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)} = 1. \quad (\text{A-11})$$

∴ verifica-se, como esperado, que o $\sum_{n=2}^{\infty} P(n) = 1$.

Com base na seguinte dedução,

$$\sum_{n=2}^{\infty} n x^{n-1} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{d}{dx} x^n = \frac{d}{dx} \sum_{n=2}^{\infty} x^n = \frac{d}{dx} \frac{x^2}{1-x} = \frac{(1-x)2x + x^2}{(1-x)^2} = \frac{2x - x^2}{(1-x)^2} = \frac{x(2-x)}{(1-x)^2}, \quad (\text{A-12})$$

o número médio de transições vem expresso por,

$$\begin{aligned} E(n) &= \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha-\beta} \left\{ \frac{\alpha(2-\alpha)}{(1-\alpha)^2} - \frac{\beta(2-\beta)}{(1-\beta)^2} \right\} \\ &= \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha-\beta} \left\{ \frac{(1-\beta)^2 \alpha(2-\alpha) - \beta(2-\beta)(1-\alpha)^2}{(1-\alpha)^2(1-\beta)^2} \right\} \\ &= \frac{(1-\beta)^2 \alpha(2-\alpha) - (1-\alpha)^2 \beta(2-\beta)}{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha-\beta)} \\ &= \frac{\alpha(1-\beta)^2(1-\alpha) - \beta(1-\alpha)^2(1-\beta) + \alpha(1-\beta)^2 - \beta(1-\alpha)^2}{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha-\beta)}. \quad (\text{A-13}) \\ &= \frac{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha(1-\beta) - \beta(1-\alpha))}{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha-\beta)} + \frac{\alpha(1-\beta)^2 - \beta(1-\alpha)^2}{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha-\beta)} \\ &= 1 + \frac{\alpha(1-2\beta+\beta^2) - \beta(1-2\alpha+\alpha^2)}{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha-\beta)} \\ &= 1 + \frac{\alpha(1+\beta^2) - \beta(1+\alpha^2)}{(1-\alpha)(1-\beta)(\alpha-\beta)} \end{aligned}$$

Portanto, o número médio de transições desde que a frequência de portadora sai do estado S_0 até que regresse ao estado S_0 , é dado por

$$E(n) = 1 + \frac{1-\alpha\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)} = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{\beta}{1-\beta}. \quad (\text{A-14})$$

A.2 Expressão (3-33) e (3-34)

Nesta secção, apresentam-se as derivações das expressões (3-33) e (3-34), as quais devolvem o número médio de transições no estado S_0 e S_A , respectivamente.

Note-se que o número de transições no estado S_0 , corresponde ao número de transições até que a frequência de portadora saia de lá. $S_f \in S_A \cup S_0 \cup S_f$

A Figura A-2 representa a cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_0 .

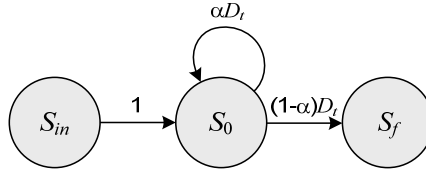


Figura A-2 Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_0

O modelo da Figura A-2 permite calcular o número médio de transições no estado S_0 . Segundo o mesmo,

$$S_f = \frac{(1-\alpha)D_t S_{in}}{1-\alpha D_t}, \quad (\text{A-15})$$

ou seja,

$$S_f = (1-\alpha) D_t (1 + \alpha D_t + \alpha^2 D_t^2 + \dots) S_{in}. \quad (\text{A-16})$$

Se n representa o número de transições até chegar a S_f e $n-1$ o número de transições em S_0 , a probabilidade de ocorrerem n transições em S_0 , considerando $D_t=1$, é

$$P(n) = (1-\alpha)\alpha^n, \quad n \geq 1. \quad (\text{A-17})$$

Logo o número médio de transições em S_0 é dado por,

$$E(S_0) = (1-\alpha) \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)\alpha^n. \quad (\text{A-18})$$

Com base na seguinte dedução,

$$\sum_{n=0}^{\infty} n x^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d}{dx} x^n = \frac{d}{dx} \frac{1}{1-x} = \frac{1}{(1-x)^2}, \quad (\text{A-19})$$

o número médio de transições no estado S_0 vem expresso por,

$$E(S_0) = (1-\alpha) \sum_{n=0}^{\infty} n \alpha^{n+1} = \alpha(1-\alpha) \sum_{n=0}^{\infty} n \alpha^{n-1} = \frac{\alpha(1-\alpha)}{(1-\alpha)^2} = \frac{\alpha}{1-\alpha}. \quad (\text{A-20})$$

Assim sendo, o número de transições no estado S_A é,

$$E(S_A) = E(n) - \frac{\alpha}{1-\alpha}. \quad (\text{A-21})$$

Substituindo $E(n)$ pela expressão (A-14), obtém-se

$$E(S_A) = 1 + \frac{1-\alpha\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)} - \frac{\alpha}{1-\alpha} = 1 + \frac{1-\alpha\beta-\alpha(1-\beta)}{(1-\alpha)(1-\beta)} = 1 + \frac{1-\alpha}{(1-\beta)(1-\alpha)} = 1 + \frac{1}{1-\beta}. \quad (\text{A-22})$$

Obviamente o número de transições em S_0 só depende de α e em S_A de β .

A.3 Expressão (3-35)

Nesta secção, apresenta-se a derivação da expressão (3-35), a qual devolve o número médio de transições entre os estados S_1 e S_2 , supondo que a frequência de portadora está no estado S_A .

A Figura A-3 representa o cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_A . De acordo com a mesma, $\beta D_t q$ representa a probabilidade de transição entre frequências disponíveis.

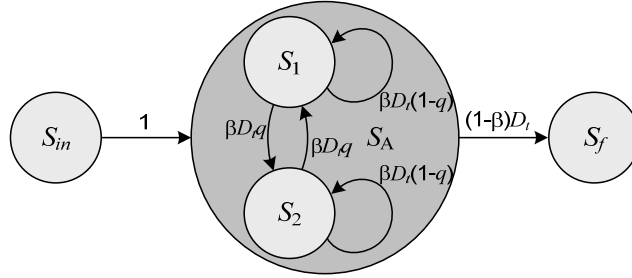


Figura A-3 Cadeia de Markov para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando os estados S_1 e S_2

Posto isto, a cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_A , é dado por

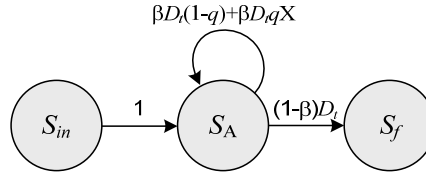


Figura A-4 Cadeia de Markov equivalente para as transições de frequência de portadora do rádio oportunista, considerando apenas o estado S_A

O modelo da Figura A-4 permite calcular o número médio de transições entre S_1 e S_2 antes de voltar a S_0 . Segundo o mesmo,

$$S_A = S_{in} + S_A (\beta D_t (1-q) + \beta D_t q X) = \frac{S_{in}}{1 - \beta D_t (1-q) + \beta D_t q X}, \quad (A-23)$$

e,

$$\begin{aligned} S_f &= \frac{(1-\beta) D_t S_{in}}{1 - \beta D_t (1-q) - \beta D_t q X} = \frac{1 - \beta D_t}{1 - \beta D_t (1-q)} \frac{S_{in}}{1 - \frac{\beta D_t q X}{1 - \beta D_t (1-q)}} \\ &= \frac{1 - \beta D_t}{1 - \beta D_t (1-q)} \left(1 + \frac{\beta D_t q}{1 - \beta D_t (1-q)} X + \left(\frac{\beta D_t q}{1 - \beta D_t (1-q)} \right)^2 X^2 + \dots \right) \end{aligned} \quad (A-24)$$

onde X representa a ocorrência ou não ocorrência de transição entre frequências disponíveis.

Considerando $D_i=1$, a probabilidade de ocorrerem n transições dentro do estado S_A , é

$$P(n) = \frac{1-\beta}{1-\beta(1-q)} \left(\frac{\beta q}{1-\beta(1-q)} \right)^n. \quad (\text{A-25})$$

Logo o número médio de transições vem definido por,

$$E(S_1, S_2) = \frac{1-\beta}{1-\beta(1-q)} \sum_n \left(\frac{\beta q}{1-\beta(1-q)} \right)^n. \quad (\text{A-26})$$

Com base na seguinte dedução,

$$\sum_{n=0}^{\infty} n x^n = x \sum_{n=0}^{\infty} n x^{n-1} = x \frac{d}{dx} \sum_{n=0}^{\infty} x^n = x \frac{d}{dx} \frac{1}{1-x} = x \frac{1}{(1-x)^2} = \frac{x}{(1-x)^2}. \quad (\text{A-27})$$

o número médio de transições entre os estados S_1 e S_2 , vem expresso por

$$\begin{aligned} E(S_1, S_2) &= \frac{1-\beta}{1-\beta(1-q)} \sum_n \left(\frac{\beta q}{1-\beta(1-q)} \right)^n = \frac{1-\beta}{1-\beta(1-q)} \frac{\frac{\beta q}{1-\beta(1-q)}}{\left(1 - \left(\frac{\beta q}{1-\beta(1-q)} \right) \right)^2} \\ &= \frac{(1-\beta)\beta q}{(1-\beta(1-q))^2} \frac{(1-\beta(1-q))^2}{(1-\beta(1-q)-\beta q)^2} = \frac{(1-\beta)\beta q}{(1-\beta)^2} = \frac{\beta q}{1-\beta} \end{aligned} \quad (\text{A-28})$$

Referências

- [1] Página Web da WRC 2007, <http://www.itu.int/ITU-R/conferences/wrc/wrc-07/index.asp>
- [2] FCC, ET Docket No 02-155 *Spectrum Policy Task Force Report*, Novembro 2003.
- [3] Shared Spectrum Company, "Spectrum Occupancy Measurements: National Science Foundation Roof, Arlington, Virginia, 16 de Abril, 2004", Agosto 2005.
- [4] Shared Spectrum Company, "Spectrum Occupancy Report for New York City during the Republican Convention, 30 de Agosto – 1 de Setembro 2004", Janeiro 2005.
- [5] Shared Spectrum Company, "Spectrum Occupancy Measurements: Shared Spectrum Office Roof, Vienna, Virginia, 15 a 16 de Dezembro, 2004", Agosto 2005.
- [6] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environment," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 131-136, Novembro 2005.
- [7] Joseph Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communication," in *Proc. IEEE Int'l Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)* 1999, pp. 3-10, Novembro 1999.
- [8] R. W. Brodersen, A. Wolisz, D. Cabric, S. M. Mishra and D. Willkomm, "CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Use of Virtual Unlicensed Spectrum," *Berkeley Wireless Research Center (BWRC) White paper*, 2004.
- [9] B. Ackland and I. Seskar, "High Performance Cognitive Radio Platform with Integrated Physical & Network Layer Capabilities," *BWRC Cognitive Radio Workshop*, Novembro, 2004.
- [10] C. J. Rieser, T. W. Rondeau and C. W. Bostian, "Cognitive Radio Architecture Based on Genetic Algorithms – A Proposal and Initial Results," *Submitted to IEEE Tans. on Wireless Communication*.
- [11] J. Neel, J. H Reed and R. P. Gilles, "Convergence of cognitive radios," *IEEE WCNC* 2004.
- [12] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE L. on Select. Areas on Communications*, Vol. 23, No.2, pp. 201-220, Fevereiro 2005.
- [13] Página Web da ANACOM, <http://www.anacom.pt>
- [14] Página Web da FCC, <http://www.fcc.gov>
- [15] Staple, G.; Werbach, K, "The End of Spectrum Scarcity," *IEEE Spectrum*, Vol. 41, pp. 48-52, Março 2004.
- [16] FCC, ET Docket No 03-222 *Notice of Proposed Rule Making and Order*, Dezembro 2003.
- [17] Joseph Mitola III, "Cognitive Radio an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," *PhD thesis*, KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, 2000.
- [18] F. K. Jondral, "Software-Defined Radio – Basic and Evolution to Cognitive Radio," *EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking* 2005.

- [19] Bruce Fette, "Cognitive Radio Technology," *Communications Engineering Series*, Newnes, 2006.
- [20] Página Web do projecto ORACLE, <http://www.ist-oracle.org>
- [21] T.A. Weiss, J. Hillenbrand, A. Krohn and F. K. Jondral, "Efficient Signaling of Spectral Resources in Spectrum Pooling Systems," in *Proc. 10th Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT)*, Novembro 2003.
- [22] T.A. Weiss and F. K. Jondral, "Spectrum Pooling: An Innovative Strategy for the Enhancement of Spectrum Efficiency," *IEEE radio communication magazine*, Vol. 42, pp. 8-14, Março 2004.
- [23] D. Cabric, S. M. Mishra, D. Willkomm, R. W. Brodersen and A. Wolisz, "CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Use of Virtual Unlicensed Spectrum," in *Proc. 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Junho 2005.
- [24] Página Web do Projecto XG, <http://www.darpa.mil/ato/programs/XG>
- [25] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru and S. Shankar, "IEEE 802.22: The First Worlwide Wireless Standard based on Cognitive Radios," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 328-337, Novembro 2005.
- [26] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks, <http://www.ieee802.org/22/>
- [27] "RAN Requirements", *Doc Num.* 22-05-0007-46-0000.
- [28] M. M. Buddhikot, P. Kolody, S. Miller, K. Ryan and J. Evans, "DIMSUNNet: New Directions in Wireless Networking Using Coordinated Dynamic Spectrum Access," in *Proc. IEEE WoWMoM 2005*, pp. 78-85, Junho 2005.
- [29] T. Kamakaris, M. M. Buddhikot and R. Iyer, "A Case for Coordinated Dynamic Spectrum Access in Cellular Networks," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 289-298, Novembro 2005.
- [30] M.M. Buddhikot and K. Ryan, "Spectrum Management in Coordinated Dynamic Spectrum Access Based Cellular Networks," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 299-307, Novembro 2005.
- [31] L. Xu, R. Tonjes, T. Paila, W. Hansmann, M. Frank and M. Albrecht, "DrIVE-ing to the Internet: Dynamic Radio for IP services in Vehicular Environments," in *Proc. of 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 281-289, Novembro 2000.
- [32] D. Grandblaise, D. Bourse, K. Moessner, and P. Leaves, "Dynamic Spectrum Allocation (DSA) and Reconfigurability" in *Proc. Software-Defined Radio Forum (SDR)*, Novembro 2002.
- [33] P. Leaves, K. Moessner, R. Tafazoli, D. Grandblaise, D. Bourse, R. Tonjes and M. Breveglieri, "Dynamic Spectrum Allocation in Composite Reconfigurable Wireless Networks," *IEEE Comm. Magazine*, Vol. 42, pp. 72-81, Maio 2004.
- [34] I. F. Akyildiz and Y. Li, "OCRA: OFDM-based Cognitive Radio Networks," *Broadband and Wireless Networking Laboratory Technical Report*, Março 2006.
- [35] S.M. Nishra, D. Cabric, C. Chang, D. Willkomm, B. Schewick, A. Wolisz and R. W. Brodersen, "A Real Time Cognitive Radio Testbed for Physical and Link Layer Experiments," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 562-567, Novembro 2005.
- [36] D. Willkomm, J. Gross, and A. Wolisz, "Reliable Link Maintenance in Cognitive Radio Systems," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 371-378, Novembro 2005.

-
- [37] C. J. Riser, T. W. Rondeau and C. W. Bostian, "Cognitive Radio Architecture Based on Generic Algorithms – A proposal and initial results", *Submitted to IEEE Transaction on Wireless Communications*.
- [38] J. Schiffer, "Cognitive Tools and Systems," *BWRC Workshop on Cognitive Radio*, Novembro 2004.
- [39] S. Soliman, "Cognitive Radio: key indicators," *BWRC Workshop on Cognitive Radio*, November 2004.
- [40] B. Krenik and C. Panasiak, "Cognitive Radios for Unlicensed WANs", *BWRC Workshop on Cognitive Radio*, Novembro 2004.
- [41] Página Web, <http://www.propagatenet.com>
- [42] A. Sahai, N. Hoven and R. Tandra, "Some Fundamental Limits in Cognitive Radio," *Allerton Conf. on Comm. Control and Computing* 2004, Outubro 2004.
- [43] Z. Tian and G. B. Giannakis, "A Wavelet Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radios," *Proc. of Intl. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Coms.*, Mykonos Island, Grécia, 8-10 de Junho de 2006.
- [44] F. Digham, M. Alouini and M. Simon, "On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels," in *Proc. IEEE ICC* 2005, Vol. 5, pp. 3575-3579, Maio 2005.
- [45] G. Ganesan and Y. G. Li, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 137-143, Novembro 2005.
- [46] D. Cabric, S. M. Mishra and R. W. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios," in *Proc. 38th Asilomar Conference on Signals Systems and Computers* 2004, pp. 772-776, Novembro 2004.
- [47] A. Fehske, J. D. Gaeddert and J. H. Reed, "A New Approach to Signal Classification Using Spectral Correlation and Neural networks," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 144-150, Novembro 2005.
- [48] H. Tang, "Some Physical Layer Issues of Wide-band Cognitive Radio System," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 151-159, Novembro 2005.
- [49] P. Marques, L. Doyle and A. Gameiro, "SDR for Opportunistic Use of UMTS Licensed Bands," *SDR Forum Technical Conference*, Orlando, Florida, EUA, Novembro 2006.
- [50] Q. Zhao, L. Tong and A. Swami, "Decentralized Cognitive MAC for Dynamic Spectrum Access," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 224-232, Novembro 2005.
- [51] H. Zheng and L. Cao, "Device-centric Spectrum Management," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 56-65 Novembro 2005.
- [52] J. Zhao, H. Zheng and G.-H. Yang, "Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Allocation Networks," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 259-268, Novembro 2005.
- [53] S. Shankar, "Spectrum Agile Radios: Utilization and Sensing Architecture," in *Proc. IEEE DySPAN* 2005, pp. 160-169, Novembro 2005.
- [54] FCC, ET Docket No 03-237 *Notice of Inquiry and Notice of Proposed Rulemaking*, Novembro 2003.
-

- [55] T. X. Brown, "An Analysis of Unlicensed Device Operation in Licensed Broadcast Service Bands," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 11-29, Novembro 2005.
- [56] B. Wild and K. Ramchandran, "Detecting Primary Receivers for Cognitive Radio Applications," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 124-130, Novembro 2005.
- [57] G. Ganesan and Y. G. Li, "Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio networks," in *Proc. GLOBECOM*, pp. 2505 – 2509, Novembro 2005.
- [58] Página Web do IP Mobile, <http://www.ipmobile.jp>
- [59] Página Web do IEEE 802.22 WRAN WG, <http://www.ieee802.org/22>
- [60] Simulador de Referência v2.15 IT/CCSR/FTR&D IST-MATRICE 10/11/2005.
- [61] COST 231 Relatório Final, disponível em, <http://www.lx.it.pt/cost231/>
- [62] X. Cai and G. B. Giannakis, "A Two-Dimensional Channel Simulation Model for Shadowing Processes," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 52, No.6, Novembro 2003.
- [63] Y. Li and X. Huang, "The Generation of Independent Rayleigh Faders," in *Proceedings of IEEE, ICC'00*, 2000.
- [64] Ross, Sheldon M. (1997), "Introduction to Probability Models," 6th edition, Berkeley, CA: Academic Press.
- [65] Rec. ITU-R M.1225 - *Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000*.
- [66] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study on the mitigation of the effect of the Common Pilot Channel (CPICH) interference at the User Equipment (Release 5)," TR 25.991. v5.1.0, Dezembro 2002.
- [67] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 6)," TS 25.104. v6.13.0, Junho 2006.
- [68] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD) (Release 6)," TS 25.101. v6.13.0, Outubro 2006.
- [69] European Radiocommunications Committee (ERC). *The European table of frequency allocations and utilization*.
- [70] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) radio transmission and reception (TDD) (Release 6)," TS 25.102. v6.5.0, Outubro 2006.